



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V
BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV
ENERGY INSTITUTE

APLIKAČNÍ PŘÍPADY VYUŽITÍ
ZKAPALNĚNÉHO ZEMNÍHO PLYNU
APPLICATION CASES FOR THE USE OF LIQUEFIED NATURAL GAS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Radek Kantor

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Bc. Radek Kantor**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Energetické inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Aplikační případy využití zkapalněného zemního plynu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Náplní práce je seznámení s problematikou využití zkapalněného zemního plynu v energetickém zásobování. V rámci práce bude obecně představena technologie skladování a využití LNG. Konkrétní hodnocení využitelnosti LNG bude provedeno na vybraných aplikacích, např. ostrovní plynovod, řešení špičkových odběrů plynu, alternativy pro silniční vozidla, atd.

Cíle diplomové práce:

1. Zpracovat stručnou rešerši o zkapalněném zemním plynu (LZP) a souvisejících technologiích.
2. Na konkrétních případech demonstrovat možnosti regenerace energie při odparu LNG.
3. Posoudit zadaný aplikační případ využívající LNG z hlediska technického a ekonomického.

Seznam doporučené literatury:

DVORSKÝ, E. a HEJTMÁNKOVÁ, P. , Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 8073001187.

PAVELEK, M., Termomechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 9788021443006.

KANDLIKAR, S., Masahiro, S. a DHIR, V., Handbook of phase change: boiling and condensation. Philadelphia, PA: Taylor, xlvii, 738 p., 1999. ISBN 15-603-2634-4.

KUPPAN, T., Heat exchanger design handbook. USA, New York: Taylor and Francis, 2000. ISBN 0-8247-9787-6.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

.....
doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

.....
doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou spjatou s LNG. Rozebírá problematiku zkapalňování, skladování, dopravy a opětovného zplynování. V této práci bylo zahrnuto využití LNG ke zvyšování účinnosti tepelných cyklů se zaměřením na Braytonův cyklus. V práci došlo také k přepočtu zadaného cyklu s cílem potvrdit dosažené závěry v dané práci.

Klíčová slova

LNG, zemní plyn, Braytonův cyklus, Rankin- Clausiův cyklus

Abstract

This master thesis deals with problems tied to the LNG. It discusses problems occurring during liquification, storage, transportation and regasification. In this work was shown using LNG to increase efficiency of heat cycles, with focus on Brayton's cycle. Part of this work focuses on recalculation of predefined work to confirm their conclusions.

Key words

LNG, natural gas, Brayton cycle, Rankine cycle

Bibliografická citace

KANTOR, R. *Aplikační případy využití zkapalněného zemního plynu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019, 61. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma Aplikací případy využití zkapalněného zemního plynu vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Jiřího Pospíšila, Ph.D., s použitím uvedených zdrojů a literatury.

V Brně dne 20. 5. 2019

.....
Bc. Radek Kantor

Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D. za všechno věnovaný čas, ochotu, vstřícnost, odborné rady a připomínky během vypracovávání této diplomové práce.

Obsah

1. Úvod	7
2. Charakteristické vlastnosti LNG a historie jeho využití.....	8
2.1 Vlastnosti LNG	8
2.2 Historie LNG	8
2.3 První komerční využití.....	8
2.4 Alternativa ke LNG	9
3. Způsoby výroby LNG.....	10
3.1 Technologie pro zkapalňování zemního plynu	11
3.2 Cykly pro zkapalňování zemního plynu	13
3.2.1 Klasická kaskáda	14
3.2.2 Míšený chladicí cyklus	14
3.2.3 C3MR cyklus.....	15
3.3 Experimentální optimalizační technologie pro zkapalňování zemního plynu	16
3.3.1 Na dusíku založený osamocený a dvojitý expandérový proces	16
3.3.2 Vylepšený C3MR zkapalňovací proces.....	17
3.3.3 Trigenerace v míšeném fluidním kaskádovém (MFC – Mixed Fluid Cascade) zkapalňovacím procesu.....	17
3.3.4 Nahrazení Joule-Thomsonovy klapky za kryogenickou hydraulickou turbínu	18
4. Skladování LNG	19
4.1 Kryogenní nadzemní skladování	19
4.1.1 Ocel.....	19
4.1.2 Beton.....	20
4.1.3 Hybridní konstrukce	21
4.2 Kryogenní skladování v zemi	21
4.2.1 Konvenční nádrže	21
4.2.2 Dutiny ve zmrzlé zemi.....	21
4.2.3 Vytěžené jeskyně.....	22

5.	Doprava LNG	23
5.1	Doprava za pomoci kamionů	23
5.2	Potrubí.....	23
5.3	Vlaky.....	23
5.4	Tankery na LNG	23
5.4.1	Membránové nádrže	25
5.4.2	Sférické nádrže	27
6.	Zplyňování.....	29
7.	Využití LNG	31
7.1	Doprava za pomoci LNG.....	31
7.2	Průmyslové chladicí systémy	32
7.3	Teplárenství a energetika.....	32
7.4	Jiná využití	33
8.	Účinnost Braytonova cyklu při využití LNG za ideálních podmínek	35
8.1	Výpočet Braytonova cyklu bez LNG chlazení	35
8.2	Výpočet Braytonova cyklu s LNG chlazením.....	37
9.	Výpočet Braytonova cyklu s využitím regenerace energie	40
9.1	Využití EES	40
9.2	Vysokoteplotní CBC (uzavřený Braytonův cyklus) a využití LNG jako chladiče.....	42
9.2.1	CBC bez přehřívání.....	43
9.2.2	Celkový výpočet CBC cyklu s přehříváním.....	45
10.	Výpočet elektrárny s využitím LNG pracující s CBC a ORC cyklem v sérii	49
10.1	Technický výpočet elektrárny	49
10.2	Ekonomické zhodnocení elektrárny	52
11.	Závěr.....	54
12.	Seznam použitých zdrojů.....	55
13.	Seznam použitých značek a symbolů	57

1. Úvod

Od roku 1848, kdy začala průmyslová revoluce, množství energie které lidstvo spotřebovává a potřebuje k udržování stále větší a větší kvality života každým rokem roste. Toto tempo růstu se za posledních 20 let výrazně zvětšilo, přestože se se stále se vyvíjející novou technologií, vznikají větší úspory energie. Je třeba si ale uvědomit, že množství spotřebičů v domácnostech je mnohem větší, než tomu kdysi bylo a je zcela normální vidět v každé domácnosti kávovary, toasty, indukční plotýnky, varné konvice a mnohem více elektrických spotřebičů. Úspory, získané za pomoci nových technologií, nejsou schopny vyrovnat nárůst, které více elektrických spotřebičů přinesou. S rozvojem elektrických aut spotřeba energie pouze poroste.

Z těchto důvodů se tedy hledají nové způsoby získávání energie nebo vylepšování stávajících energetických celků. V energetice se využívají 2 cykly, známé jako Rankin-Clausiusův cyklus a Braytonův cyklus. Většina elektráren, ať je to tepelná nebo i jaderná, pracují na Rankin-Clausiově cyklu. Braytonův cyklus se používá u spalovacích turbín. I když se přechází na „zelenou“ energii, tato energie není schopna celkovou spotřebu energie pokrýt a má zásadní problémy. Co když nebude svítit nebo foukat? Výzkum jde ale dopředu a další čistá energie, která by mohla pokrýt velkou část spotřeby, je fúzní energie, kterou bychom mohli vidět ve funkčním provedení v roce 2025. Do té doby, se ale bude muset zjistit, jak zefektivnit stávající energetickou soustavu.

Tato práce se zabývá jedním z takovýchto možností zlepšování, ale není omezena pouze zefektivňováním energetických soustav, ale má využití v celé řadě odvětví. Největším odvětvím je doprava a v Česku se i objevila první LNG stanice. LNG se dá ale také využít v potravinářském průmyslu, pro chlazení zmražených výrobků nebo i jako pomocný zdroj paliva v teplárnách. Proč tomu ale tak je? LNG není nic víc, než jen zkapalněný zemní plyn, ale tímto zkapalněním lze dosáhnout toho, že značně zmenším jeho objem a zvýším tak jeho energetickou hodnotu. Při tomto zkapalnění dosahuje teplot až -162°C . Smyslem práce je se zaměřit na využití LNG v podmínkách České Republiky.

2. Charakteristické vlastnosti LNG a historie jeho využití

2.1 Vlastnosti LNG

LNG (z anglického Liquefied Natural Gas) je zkapalněný zemní plyn. Jelikož je to zemní plyn, tak se skládá převážně z metanu, CH_4 . Přesné množství metanu obsažené ve LNG se liší, ale pohybuje se od 90% výš. Zbytek jsou další složky, jako je kyslík a propan-butan. Dosahuje teplot až -162°C a začíná vřít při teplotě varu -161°C . Je zcela bez zápachu, není toxický dokonce ani nezpůsobuje korozi. Při srovnání s jeho plynnou formou má až 600x menší objem, což je skvělé pro převoz, neboť se může dovézt mnohem více zemního plynu v tankeru na LNG. Uchovává se při nízkých tlacích kolem 10 kPa. Hustota je 426 kg/m^3 , jako plyn má pouhých $0,656 \text{ kg/m}^3$, což je 650x méně. Výhřevnost se pohybuje mezi 45-50 MJ/kg [1].



Obr. 1: Zkapalněný zemní plyn [2]

Nezkapalňuje se ale nezpracovaný zemní plyn, ale až upravený, který má pouze velmi málo nečistot, jinak by zkapalňování nebylo možné.

2.2 Historie LNG

První experimenty se změnou skupenského stavu plynů začaly už v 17. století Robertem Boylem. Ten hledal spojitost mezi tlakem a objemem plynů. Guillaume Amontons zkoumal, co udělá změna teploty s plynem. Takovéto testy pokračovaly 200 let se snahou zkapalnit *všechny* plyny. Teprve až v polovině 18. století došlo ke zkapalnění většiny plynů, kromě helia, které bylo zkapalněno až v roce 1908. Zkapalnit metan (hlavní složku zemního plynu) se podařilo zkapalnit už v roce 1886 Karlem Olszewskim. První velké zkapalňování zemního plynu bylo v USA v roce 1918, kdy byla snaha získat zkapalněním zemního plynu helium, což některé zemní plyny obsahovaly. Tento zkapalněný zemní plyn nebyl uschováván, ale hned znovu přeměněn na plyn. První způsob na dlouhodobé uskladnění zkapalněného zemního plynu vynalezl Godfrey Cabot [1].

2.3 První komerční využití

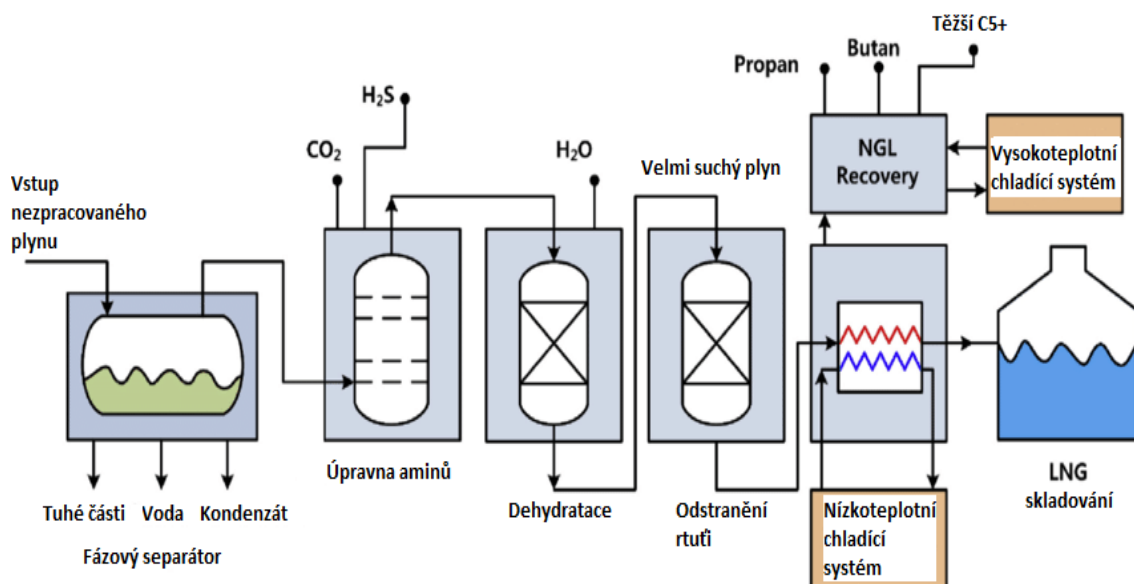
První továrna na výrobu LNG patřila *The East Ohio Gas Company*, která byla vybudována v Clevelandu v Ohiu v roce 1940. Naneštěstí za pár let, v roce 1944 došlo k nehodě. Došlo k protržení jedné kuželovité nádoby a následnému úniku LNG po zařízení a okolí. LNG se začalo rychle vypařovat, až došlo k jeho vzplanutí. Tato nehoda si vyžádala 130 obětí. Došlo k pozastavení plánů na výstavbu dalších zařízení a následných 15 let k výzkumu nových slitin, které měly zabránit dalším nehodám. Teprve až v roce 1959 se vrátilo k výstavbě LNG zařízení [1].

2.4 Alternativa ke LNG

Co se týče dalších plynů, které se objevují na trhu, je třeba zmínit některé známější a rozšířenější. Do těchto patří převážně LPG (Liquified Petroleum Gas) a CNG (Compressed Natural Gas). V Česku je spousta stanic na oba tyto paliva ve srovnání pouze s jednou na LNG, ale jejich vlastnosti nedovolují takové široké využití, jako právě LNG. Tyto paliva nejsou moc rozdílné ve zpracování. LPG je pouze zkapalněný ropný plyn. Ropný plyn vzniká při frakční destilaci ropy. CNG je jako LNG zpracovaný zemní plyn. LNG je ale ochlazován na nízké teploty, přičemž dojde k jeho zkapalnění. CNG je na rozdíl od LNG pouze komprimován za vysokých tlaků a stáčen do vysokotlakých lahví. Pojmy znějí podobně, takže je nutno vědět, co jaká zkratka znamená [3].

3. Způsoby výroby LNG

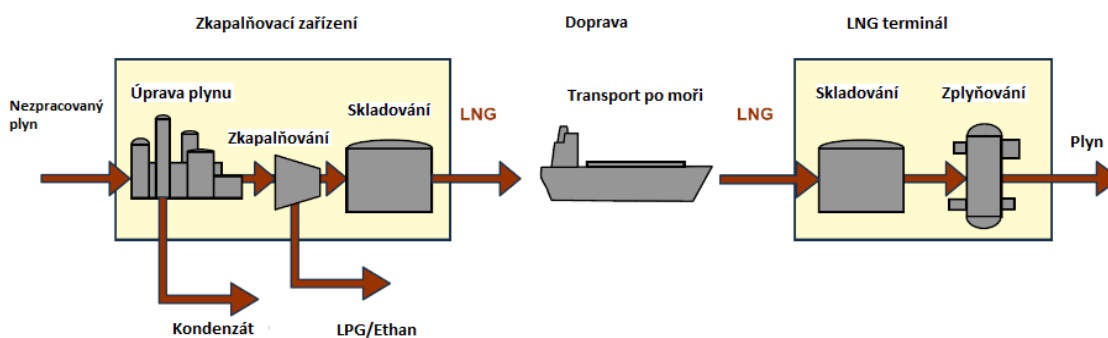
Procesy zkapařňování nejsou z hlediska postupu vůbec složité. Nezpracovaný plyn je přiveden do fázového separátoru, kde se odstraní tuhé části, voda a kondenzát. Takto zpracovaný plyn dále putuje do úpravny aminů, také známo jako *oslazovač* plynů. V tomto zařízení je vpraveno množství tekutých alkylaminů (obecně pouze aminy). Tyto aminy způsobí odstranění Sulfanu H_2S a oxidu uhličitého CO_2 . Dochází k odstranění kyselé sloučeniny, proto je taky znám jako *oslazovač* plynů. Úprava plynu ještě ale není hotová. Předtím, než se plyn přivede na zkapařňování, je ho potřeba dehydratovat (zbavit přebytečné vody). Toto se provádí v sušičce plynů. Zbývá už jenom jedna přísada obsažená v plynu, které je se nutno zbavit, a to je rtuť. Proto se využívá odstraňovač rtuti. Plně zpracovaný plyn je pak přiveden do nízkoteplotního mrazicího systému, kde už vzniká zkapařňovaný plyn. Jak už bylo ale zmíněno v předchozí kapitole. I takto zpracovaný plyn pořád obsahuje propan, butan a těžší uhlovodíky C_5+ . Ty se při zkapařňování odstraňují a znovu využijí ve speciálním zařízení pro znovuvyužití tekutin zemního plynu (LNG Recovery). Čisté LNG je následně uskladňováno [4].



Obr. 2 – Základní princip zkapařňování LNG [4]

3.1 Technologie pro zkapalňování zemního plynu

Proces úpravy zemního plynu na LNG, přesun a následné znovu zplynění je energeticky náročné. Z těchto tří dějů je energeticky nejnáročnější zkapalňování. Jak ale technologie se neustále vyvíjí, tak se i mění technologická kapacita LNG (větší LNG zkapalňovací zařízení, větší LNG tankery, větší skladovací nádrže atd.). Tímto i klesá množství energie na zpracování LNG. Z tohoto důvodu je tedy potřeba se podívat na využití LNG a optimalizovat proces zkapalňování pomocí nových postupů a technologií.



Obr. 3 – LNG řetězec [2]

Pro každou část LNG řetězce se hledá určitá optimalizace a byla provedena i spousta publikací právě o tomto problému. Některé ze zkoumaných technologií ve LNG řetězci jsou na expandéru založené technologie, míšení různých chladicích systémů, kaskádově založené technologie a hybridní procesy.



Obr. 3 – LNG instalace [5]

Použití určitých technologií záleží na několika faktorech. Jedním z hlavních faktorů je ale umístění zkapalňovacího zařízení. Jsou dvě možnosti umístění. Na pevnině nebo mimo pevninu. Základním problémem mimo pevninské instalace, je velikost a s tím i spjatá omezení. Dalšími problémy jsou pak zacházení s chladivem a pohyb zařízení. Tyto problémy pevninská instalace nemusí řešit.

Pevninské a mimo pevninské instalace mají ale své výhody a nevýhody. Pevninské instalace, jsou často budovány mimo obydlené oblasti, takže pracovní síla a technika musí být transportována na dlouhé vzdálenosti, což může způsobovat komplikace (neprůjezdné tunely a mosty). Tímto se zvyšují náklady a způsobují se stavební komplikace. Instalace mimo pevninu jsou zase stavěny poblíž loděnic, kde je pracovní síly dostatek. Cenově ale zpravidla se více oplatí velké pevninské instalace, které můžou zpracovat a uchovat mnohem více LNG. Pouze šest národů má v současné době mimo pevninské LNG instalace. Patří tam Argentina, Brazílie, Kuvajt, UAE, UK a USA. Země s velkou schopností mimo pevninské LNG instalace, jako je Rusko, Irán a Katar se ale k výstavbě nechystají.

Tabulka 1. Složení zemního plynu dle oblasti těžby [4]

Oblast	Methan	Ethan	Propan	Butan	Dusík
Abu Dhabi	87.07	11.41	1.27	0.14	0.11
Alijaška	99.80	0.10	N/A	N/A	N/A
Alžírsko	91.40	7.87	0.44	0.00	0.28
Australie	87.82	8.30	2.98	0.88	0.01
Brunei	89.40	6.30	2.80	1.30	0.00
Indonésie	90.60	6.00	2.48	0.82	0.09
Malajsie	91.15	4.28	2.87	1.36	0.32
Oman	87.66	9.72	02.4	0.69	0.00
Katar	89.87	6.65	0.91	0.98	0.19
Trinidad	92.26	6.39	0.91	0.43	0.00
Nigerie	91.60	4.60	2.40	1.30	0.10

Existují 3 často používané způsoby LNG zkapalňování. Jedná se o kryogenerátory využívající obrácený Sterlingův cyklus za použití chladiče jako je helium nebo vodík, které mohou dosáhnout teplot až -258°C . Druhým způsobem je využití kryogenních tekutin. Využívá se dusík nebo kyslík, protože jejich bod varu je pod bodem varu LNG. Řeklo by se, že zkapalnit dusík nebo kyslík je nadbytečný krok, a že to jenom zvýší energetickou náročnost zpracování LNG, jenže technologie ke zkapalnění dusíku a kyslíku jsou tak odzkoušené a dostupné, že to nehraje velkou roli. Posledním z trojice je kaskádový cyklus. Tato technologie používá kaskádu tepelných výměníků, každý s jiným médiem. Každé médium je zkapalněno stlačením a mají různé teploty varu s tím, že poslední médium v kaskádě má teplotu varu pod teplotou varu NG. Tato technologie je nejvíce využívána ve velkých LNG instalacích [4].

3.2 Cykly pro zkapalňování zemního plynu

Zchlazování je založeno na konverzi vnitřní energie tekutiny na vnější práci a druhý zákon termodynamiky prosazuje limit s ohledem na efektivitu, při které může tato konverze probíhat. Pro operaci mezi dvěma teplotami (teplota varu na konci kompresoru T_B a okolní teplota T_A). Tekutina, procházející uzavřeným cyklem, by absorbovala minimum mechanické energie.

$$W = Q = \frac{T_A - T_B}{T_B} \quad (3.1)$$

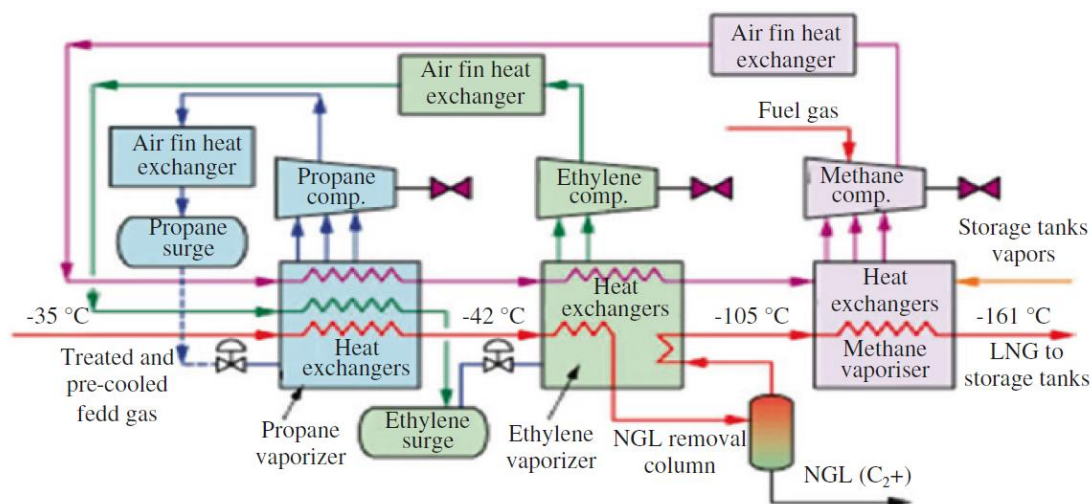
Aby došlo k přesunu energie ekvivalentní Q z T_B do T_A , vzorec definuje ideální (vratnou) energii potřebnou k chlazení. Ve skutečnosti jsou účinnosti výrazně menší. Aby došlo ke konverzi vnitřního tepla, při ochlazování v mechanickou práci může komprimovaný plyn být expandován skrz ústí a jeho teplota snížena Joule-Thompsonovým efektem, nebo energie může být získána extrakcí práce z expandujícího plynu v motoru.

Pro zkapalňování vařícího plynu, musí být plyn zchlazen pod teplotu rosného bodu. K ochlazení plynu, tepelná energie musí být odstraněna z komprimovaného plynu buď

za pomoci chladicí vody, nebo pomoci vypařování chladicí tekutiny, pokud teplota odstraňování tepla je menší, než teplota okolí [6].

3.2.1 Klasická kaskáda

Tento cyklus využívá tři oddělené chladicí tekutiny propan, etylen a metan ve třech stlačovacích chladicích cyklech operujících v následně menších teplotách s nízko teplotními cykly, odmítající teplo k dalšímu ohřevnému cyklu, vytvářející kaskádu. Podmínky pro funkci jsou tedy téměř zcela definovány, jakmile počet a typ chladicí tekutiny byl zvolen. Voda a vzduch je nejlevnější způsob chlazení, takže každý plyn je nejdříve ochlazen na teplotu okolí předtím, než se dostane do výměníku tepla se zkondenzovaným chladičem. Každé chladiivo je také zchlazeno svým vlastním výparem před expanzí ve škrtkové klapce. Nakonec, každý z více vařících chladičů může být expandován ve více než jednom tlaku, například propan za středního tlaku přechlazuje jak etylen, tak i metan. Následně dochází ke druhé expanzi za nižšího tlaku pro chlazení pouze metanu. Etylen je taky využit při dvou tlacích k ochlazení metanu ve dvou stupních před konečnou expanzí [6].

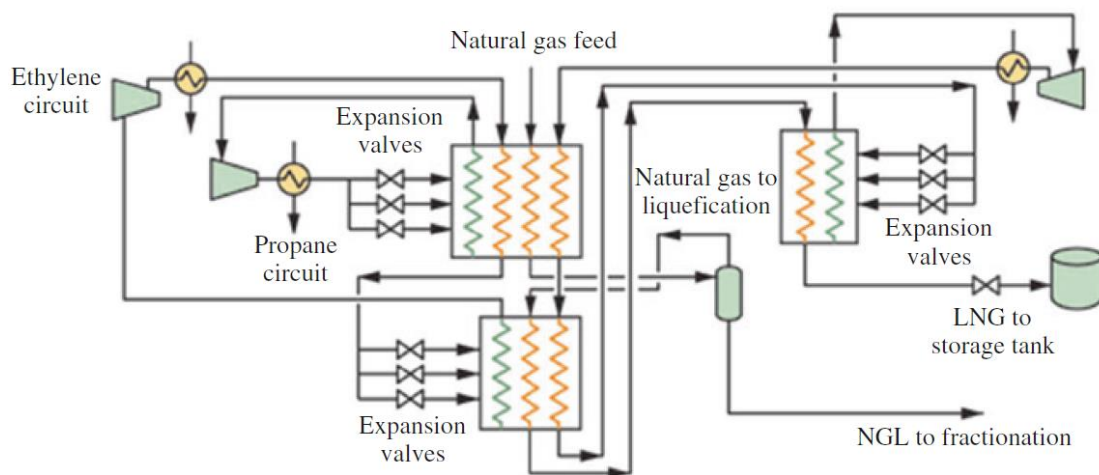


Obr. 5 – Kaskádový cyklus [6]

3.2.2 Míšený chladicí cyklus

V takovýchto cyklech, chladiivo proudí v uzavřeném proudu a působí v několika úrovních přenosu tepla při různých tlacích. Míšené chladiivo vyrobené za použití těžších uhlovodíků ze samotného zemního plynu, může být pumpováno jako samotná tekutina. Proud chladiiva se skládá z metanu, etanu, propanu a butanu stlačených na tlak kolem 40 barů ve dvou úrovních kompresorech, zchlazených chladicí vodou a rozděleny v „knockout drumu“ do zkondenzovaného propanového/butanového proudu a přebytku skládající se z lehčích komponentů. Oba proudy, společně s plničem zemního plynu, prochází prvním výměníkem (V1). Na vstupu, těžký proud je expandován do vstupního tlaku kompresoru a vrácen skrz třetí průchod výměníku. Přebytek, po předchlazení ve V1, je rozdělen ve druhé „knockout“ nádobě, etanový separátor do kondenzátu, který je expandován na vstupu V2, skrz který prochází v protiproudu s lehkým přebytkem, který také prochází skrz V2 a jde do V3. Po expanzi do vstupního tlaku kompresoru, se shledá s nízkotlakým propanovým/butanovým výparem z V1, kde došlo k výměně chladu

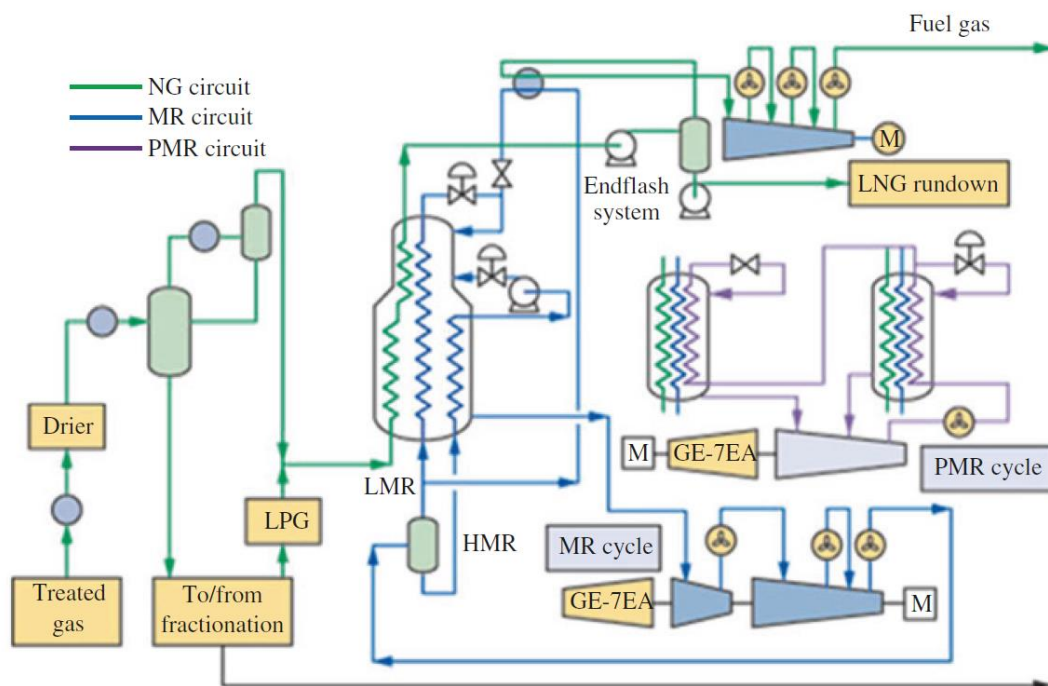
s tekutým etanem a plničem plyných proudů ve V2. V3 slouží k dalšímu ochlazení plniče zemního plynu a nezkondenovaného metanu, který je expandován na jeho výstupu do vstupního tlaku kompresoru. Jeho tok je obrácen a je mísen s ostatními expandovanými plyny po výměně tepla ve V3. Zkapalnění zemního plynu je provedeno jeho průchodem jako oddělený středotlaký proud skrz 3 výměníky tepla v sérii a expanzí plynu skrz škrťací klapku za posledním výměníkem. Mezi výhody patří menší počet kompresorů a výměníků, menší nutný prostor, jednodušší na provoz a cena [6].



Obr. 6 – Míšený chladicí cyklus [6]

3.2.3 C3MR cyklus

Jedná se o novější cyklus a je používán ve všech nových LNG zkapalňovacích zařízeních. Využívá jednoduchosti míšeného chladicího cyklu s účinností kaskádového cyklu a je využíván ve více než polovině stávajících zařízení. Je preferován právě kvůli ceně a účinnosti. Skládá se z míšeného zkapalňovacího chladicího cyklu a odděleného cyklu pro předchlazení zemního plynu a zkapalňovacího chladiva. Míšené chladivo skládající se z dusíku, metanu, etanu, propanu a někdy i butanu, je stlačeno a zchlazeno za pomoci chladicího média na okolní teplotu a před-zchlazovacího chladiva. Směs, která je rozdělena do lehkého a těžkého proudu, je zkapalněna ve svazku výměníků a následně expandována do pláště výměníku aby sloužila jako chladivo. Chladivo je postupně odpařováno a ohříváno proti zemnímu plynu a vysokotlakému chladivu ve svazcích (auto-chlazení). Chladivový výpar ze spodu pláště výměníku je znovu stlačen a smyčka je uzavřena [6].



Obr. 7 – C3MR cyklu [6]

3.3 Experimentální optimalizační technologie pro zkapalňování zemního plynu

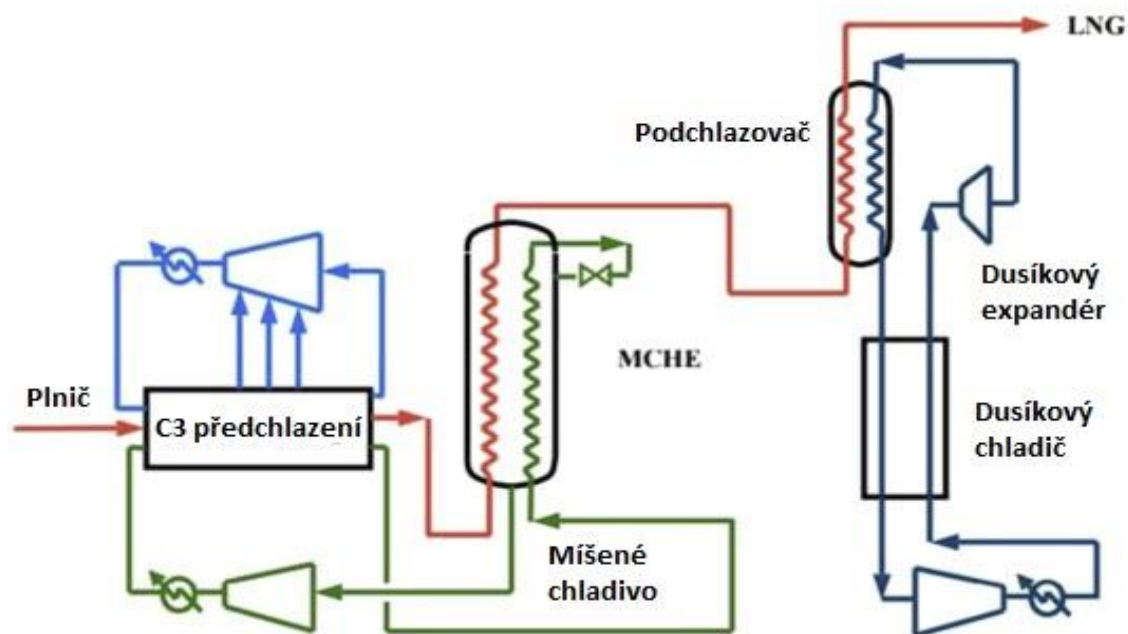
Dochází k vývoji a zkoumání různých optimalizačních řešení, které mají přinést na trh lepší energetickou úsporu při zkapalňování zemního plynu. Při jednom takovémto simulačním experimentu, který vycházel z dvojitého mísícího chladicího (DMR – Dual Mixed Refrigerant) procesu, bylo cílem dosáhnout zmenšení měrné energie pro kompresi a zmenšení velikosti výměníku tepla. Z výsledků studie se pak zjistilo, že optimalizace tohoto procesu přinesly snížení měrné energie pro kompresi až o 36%. Ve srovnání s tímto se velikost výměníku tepla snížila o pouhých 3%. Z těchto výsledků lze ale pozorovat, že nové způsoby zkapalňování zemního plynu nejsou tak daleko [4].

3.3.1 Na dusíku založený osamocený a dvojitý expandérový proces

Na dusíku založený osamocený a dvojitý expandérový proces je jeden ze zkoumaných technologických a optimalizačních řešení. Tato technologie není schopna v současnosti konkurovat stávajícím technologiím, ale je snaha toto změnit. Při této technologii se optimalizují dva parametry. Změna nízkého operačního tlaku a průtoku dusíku osamoceným dusíkovým expandérem. V současnosti je optimální energie stlačování $0,7449 \text{ kW/kg}_{\text{LNG}}$. Při dvojitém expandéru, bylo využito dvou krokové optimalizace. V prvním kroku došlo k optimalizaci tlakových úrovní a rozdělení frakcí dusíku. V druhém kroku došlo k optimalizaci teplot po stlačení a průtok dusíku pro dosažení minimální nutné energie. V tomto případě bylo dosaženo $0,5007 \text{ kW/kg}_{\text{LNG}}$ minimální energie nutné ke stlačení [4].

3.3.2 Vylepšený C3MR zkapalňovací proces

C3MR proces zahrnuje předchlazení zemního plynu na teplotu -30°C za použití propanu, jako chladiva s konečným chlazením dosaženým v hlavním tepelném výměníku s pomocí smíšeného chladiva, což je směs propanu, etanu, metanu a dusíku. Vylepšení spočívá v takzvaném AP-X procesu, který využívá dusíkovou expandérovou smyčku. Konečným důsledkem je zemní plyn o teplotě -115°C a je následně zkapalněn v dusíkové expandérové smyčce. Toto zlepšení je schopno zdvojnásobit množství LNG ve srovnání se stávající kapacitou. Energetická účinnost v současnosti ale není tak efektivní [4].



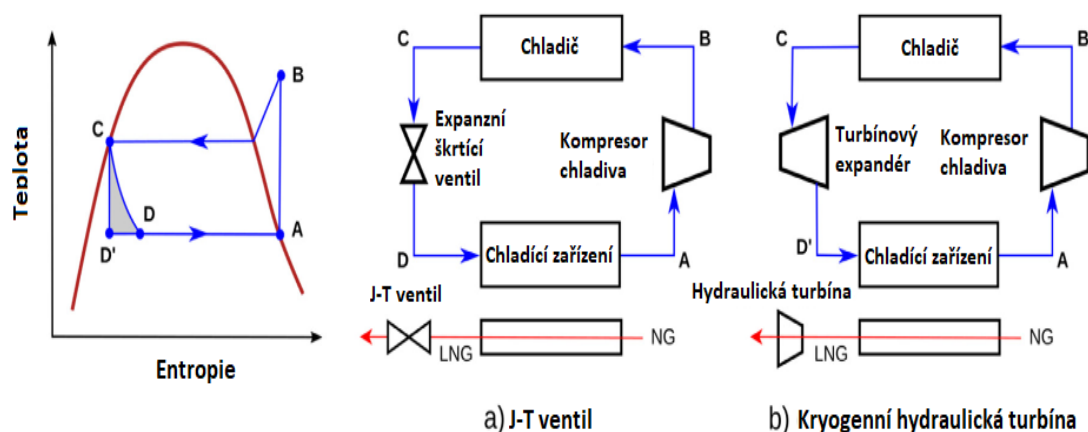
Obr. 8 – AP-XTM proces [4]

3.3.3 Trigenerace v míšeném fluidním kaskádovém (MFC – Mixed Fluid Cascade) zkapalňovacím procesu

Cílem je nahradit předchlazený plynový stlačovací chladicí cyklus použitý v MFC, za cyklus založen na vodní amoniakové absorpci. Proces byl vyzkoušen na elektrárně, založené na vysokoteplotním tekutém uhlíkovém palivovém článku (MCFC – Molten Carbonate Fuel Cell), plynové turbíně a Stirlingově motoru. V tomto případě bylo cílem získat vodík. MCFC pracovalo při teplotě 650°C a toto vyprodukované teplo bylo využito k výrobě elektřiny. Teplo uvolněno ze Stirlingova motoru a turbíny bylo zpětně využito v procesu. Z výsledků experimentu se zjistilo, že při této modifikaci by bylo potřeba $0,162 \text{ kWh/kg}_{\text{LNG}}$ energie [4].

3.3.4 Nahrazení Joule-Thomsonovy klapky za kryogennickou hydraulickou turbínu

Joule-Thomsonova klapka je v současnosti nejvíce používané zařízení pro ochlazování zemního plyn ve LNG zařízení. Pracuje na takzvaném Joule-Thomsonově cyklu. Expanzní část cyklu je izoentalpická, a tudíž energeticky neefektivní. Expanzní část kryogenní hydraulické turbíny na rozdíl od JT klapky pracuje izoentropicky s expanzní účinností nad 90%, což umožňuje získat energii zpět z expanzního procesu. Takto získaná energie může být následně použita k pohonu kompresoru zásobující NG. Tímto lze dosáhnout toho, že je potřeba o 16,5% méně měrné energie pro stlačování. Ve výsledku lze dosáhnout, kolem 2 % zisku při produkci LNG [4].



Obr. 9 – Náhrada Joule-Thomsonovy klapky za kryogenní hydraulické čerpadlo [4]

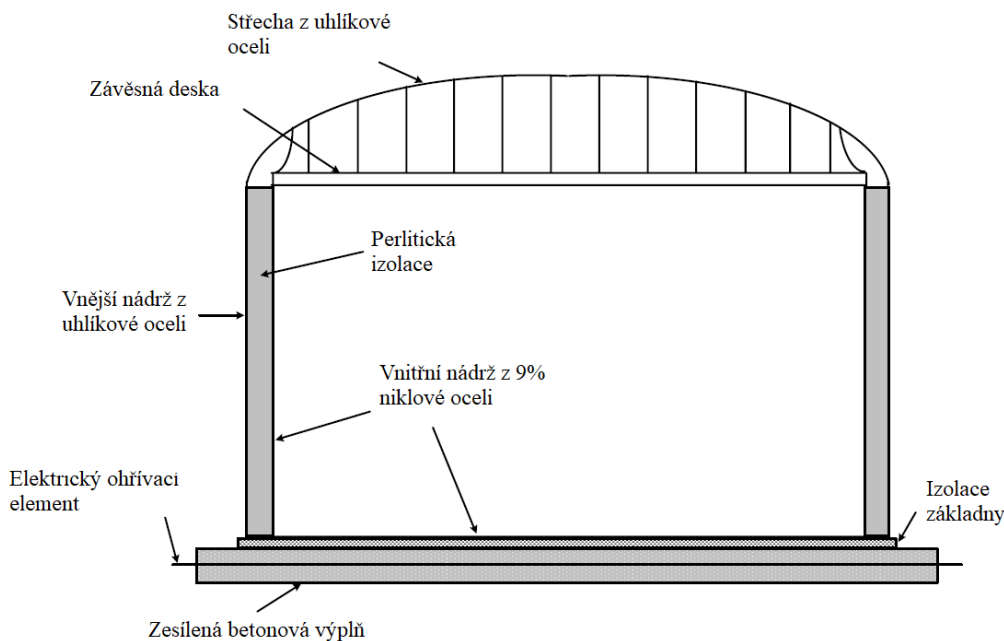
4. Skladování LNG

Protože LNG má vysokou energetickou hustotu, tak je velice výhodné ho skladovat a dopravovat. Na dlouhé vzdálenosti se používají výhradně lodě. Obecně se ale LNG skladuje 2 různými způsoby. Jedná se o nadzemní skladování a skladování v zemi. Obě mají 3 podkategorie, které budou rozebrány níže. Skladováním kryogenních tekutin má za důsledek jev, zvaný *rozvrstvení*, při kterém dojde k rozdělení tekutiny a plynu v nádrži.

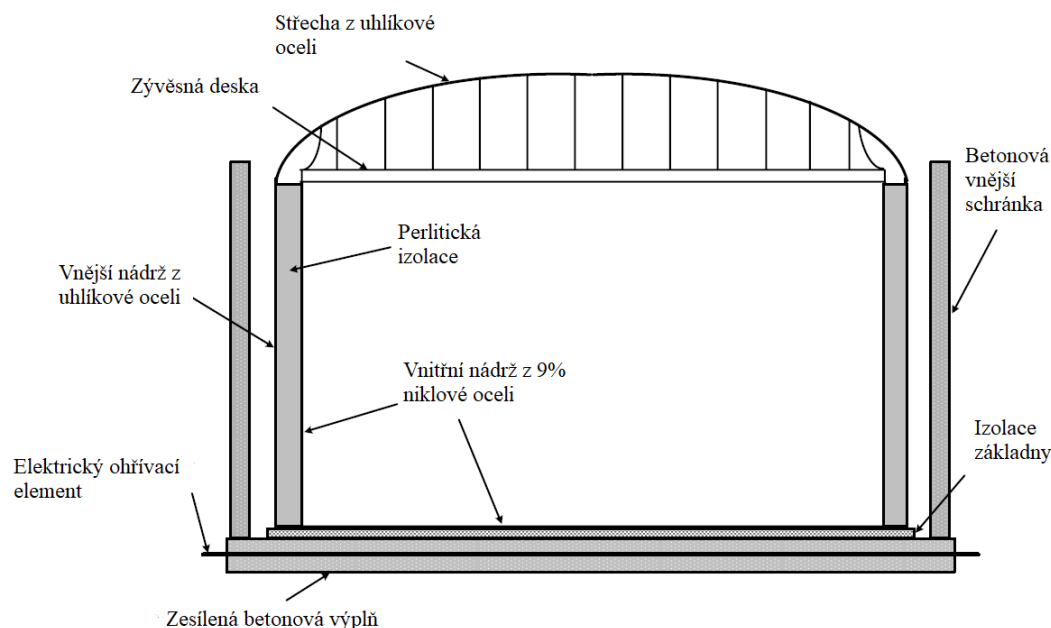
4.1 Kryogenní nadzemní skladování

4.1.1 Ocel

Existují 3 typy ocelových skladovacích nádob. Jedná se o jednoduché, dvojité nebo úplné skladovací ocelové nádoby. Skladování LNG v nadzemních ocelových nádobách je široce přijaté využití. Využívají se jak pro základní zatížení, tak i vrcholové zatížení. Pro velké LNG nádoby se do ocele přidává 9% niklu. Pro skladování LNG je ale lepší nerezavějící ocel. Ta se ale z důvodu vysoké ceny používá pouze u malých ocelových nádob, trubkách, které obsahují LNG, nebo výměníků tepla. Většina nádob se staví na základě dvojité (dvojstěnné) konfigurace nádob s plochým spodkem a s prstencovitým prostorem mezi stěnami, vyplněný izolací. Z ekonomického hlediska se oplatí více dvojitá skladovací nádoba [7].



Obr. 10 – Jednoduchá ocelová skladovací nádoba [7]

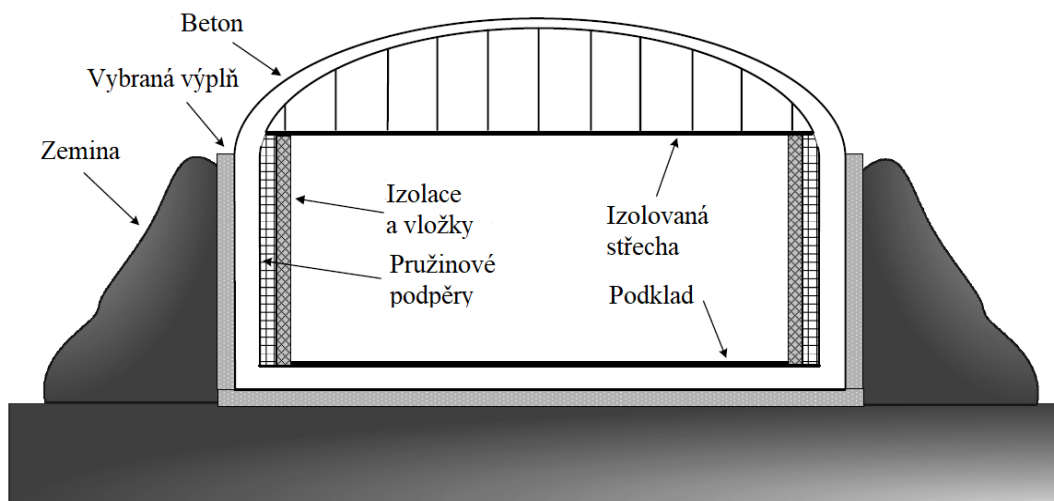


Obr. 11 – Dvojitá ocelová skladovací nádoba [7]

4.1.2 Beton

Staví se takzvané předpjaté betonové nádrže. Tyto mohou být stavěny ve 3 konfiguracích. Na úrovni, podzemní nebo částečně podzemní. Zesílené betonové zdi jsou izolovány zevnitř nádrže polyuretanem. LNG je izolováno od izolace tenkou laminátovou vrstvou, která má další ochrannou izolaci. Výpar se pohybuje kolem 0,06% celkového objemu nádoby. Toho se dá zbavit pomocí ventilátorů a může být následně znovu zkapalněn. Operační tlak nádrže odpovídá 10 cm vody. Pomocí membránových ventilů se dá připouštět či odpouštět plyn, pokud by nastaly výjimečné podmínky, jako například hurikán.

Betonové nádrže mohou být konstruovány tak, že beton je chráněn před přímým kontaktem s LNG membránovou vrstvou, což jsou pláty nepropustného materiálu, jako je kov, nebo tak, že LNG se přímo dotýká betonu. Speciálně upravený beton za normálních teplot může být přímo použit k výrobě nádrží pro skladování kryogenních tekutin. Mechanické vlastnosti betonu se příliš nemění za nízkých teplot. Výdrž betonových nádrží při kryogenních teplotách (-156 - -101 °C) je třikrát vyšší, než při normálních teplotách [7].



Obr. 12 – Předpjatá betonová skladovací nádrž na LNG [7]

4.1.3 Hybridní konstrukce

Jedná se o kombinaci oceli a předpjatého betonu. Kombinace obou způsobů dovoluje postavit nádrže největších rozměrů. Konstrukce se skládá z vnitřní nádrže vyrobené z oceli s 9 % obsahem niklu, vnější nádrž z předpjatého betonu s kryogenní izolací mezi dvěma nádržemi [7].

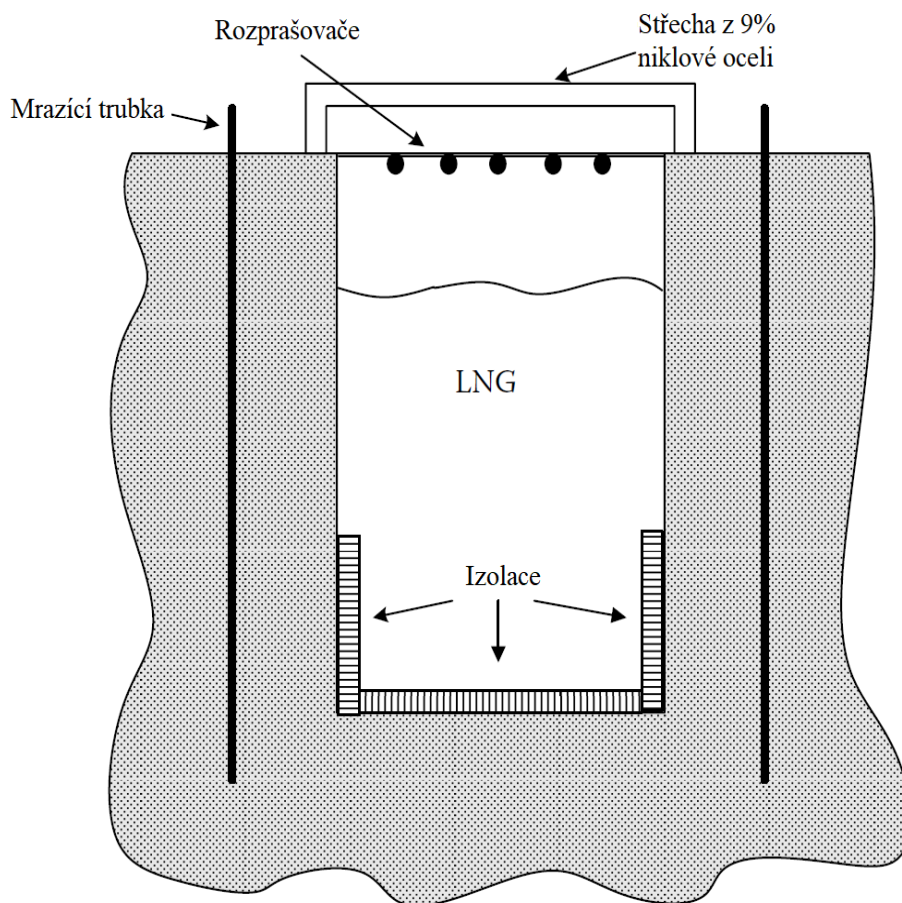
4.2 Kryogenní skladování v zemi

4.2.1 Konvenční nádrže

Na rozdíl od nadzemních nádrží, které musí udržet veškerou mechanickou energii, nádrže v zemi využívají okolní zeminu jako mechanickou podporu nebo se provádí konstrukce v jámě, kde se nádrž postaví jako samostatná jednotka a jáma slouží jako zadržovací nádrž při úniku nebo průrvě. Tyto nádrže mohou být zcela zahrabané v zemi a tím střecha nádrže musí udržet váhu zeminy, aby nedošlo k deformaci nádrže. Jelikož nádrže jsou pod velmi nízkými teplotami, tak dochází ke zmrazování okolní zeminy a jsou zapotřebí vyhřívače kolem nádrže a pod nádrží, aby se tento jev dalo regulovat, nebo zcela zamezit. Největší nádrže tohoto typu se nachází v Japonsku [7].

4.2.2 Dutiny ve zmrzlé zemi

Dutina je nejdříve zchlazena rozprašováním LNG do prostoru výparu. Střecha rychle dosáhne ustáleného stavu. Díky špatné tepelné kondukci zmrazené země, může trvat i několik let aby se okolní půda dostala do ustáleného stavu. Konečná účinnost tepelné kondukce zmrzlé země silně závisí na geologickém typu půdy a množství vody v půdě obsažené. Z historického hlediska se zjistilo, že tento typ skladování má problémy při určitých stavech, jako je využití při špičkových aplikacích [7].



Obr. 13 – Nádrž pro skladování LNG ve zmrzlé zemi [7]

4.2.3 Vytěžené jeskyně

V tomto konceptu skladování se vytvoří podzemní dutina k uskladnění LNG s tím, že stěny dutiny jsou v přímém kontaktu s LNG nebo odděleny od sebe pomocí izolantu. Délka skladování závisí na typu materiálu jeskyně a i tvaru (horizontální/vertikální). Pohybuje se kolem 10 týdnů. Stěny vertikální jeskyně mohou být obaleny betonem a vnitřní stěna pak ocelí a izolantem. Toto se ale moc nepoužívá, protože doba uskladňování v podzemních jeskyních je dost dlouhá i bez takovýchto vylepšení a z ekonomického hlediska nedává smysl [7].

5. Doprava LNG

V současnosti existují 4 různé způsoby dopravy LNG. Jedná se o kamiony, potrubí na LNG, tankery a vlaky. Nejrozšířenějším je doprava po moři v tankerech.

5.1 Doprava za pomoci kamionů

Doprava kryogenních tekutin, jako je LNG, není nic nového a už několik let se s pomocí nákladních vozů převáží tekutý vodík, dusík, helium a kyslík. Převoz LNG po silnicích je tedy už dlouho předem zavedený proces a tudíž nepotřebuje žádnou novou technologii. Hlavní odběratelé využívající kamionovou dopravu jsou čerpací stanice a odlehlá zařízení, což jsou taková zařízení, která nejsou připojena na státní síť plynového potrubí [7].

5.2 Potrubí

Dopravovat LNG za pomoci potrubí je z technického hlediska možné. Pumpovat kryogenní tekutinu vyžaduje speciální izolovanou potrubní síť s chladiči na udržování teploty, aby se předešlo odpařování. Toto se ale oplatí pouze ve výjimečných případech a pouze na omezenou vzdálenost přibližně 320 km. LNG se tedy potrubím moc často nedopravuje, ale nechá se prvně odpařit a pak se pumpeje do stávající plynové potrubní infrastruktury [7].

5.3 Vlaky

Tento způsob dopravy je v současnosti vzácný, ale neustále se rozrůstá, i když v některých zemích je zakázán, nebo stále projednáván. Zemí, která povoluje přepravu LNG za pomoci vlaků, je Japonsko, kde nádoby naplněné LNG jsou za pomoci jeřábu přeneseny na nákladní vagón. Důvody pro nepoužívání vlakové dopravy pro LNG má mnoho příčin. Jedním z nich je ochrana životního prostředí. Kdyby došlo k úniku LNG, tak okolí vlaku by bylo nenávratně poškozeno náhlým zmražením. Po rozmrazení ale žádné přetrvávající problémy nehrozí, protože LNG není toxické. Příroda ale není jediný problém. Dalším je technika. Náhlé zmrznutí a váha vagónů, by mohla způsobit rozpad kolejnic. Při zmražení na tak nízké teploty jakýkoliv náraz může způsobit rozdrčení na prach. V současnosti se zkoumá a vyvíjí speciální typ vagónů, kde se jedná prakticky o „nádř na kolech“. Tyto vlaky by přijely do doku s tankery plnými LNG a za pomoci hadic by se přímo pumpovalo LNG do vagónů. Jestli se ale tento způsob vlakové dopravy osvědčí nebo i využije, ještě není známo.

5.4 Tankery na LNG

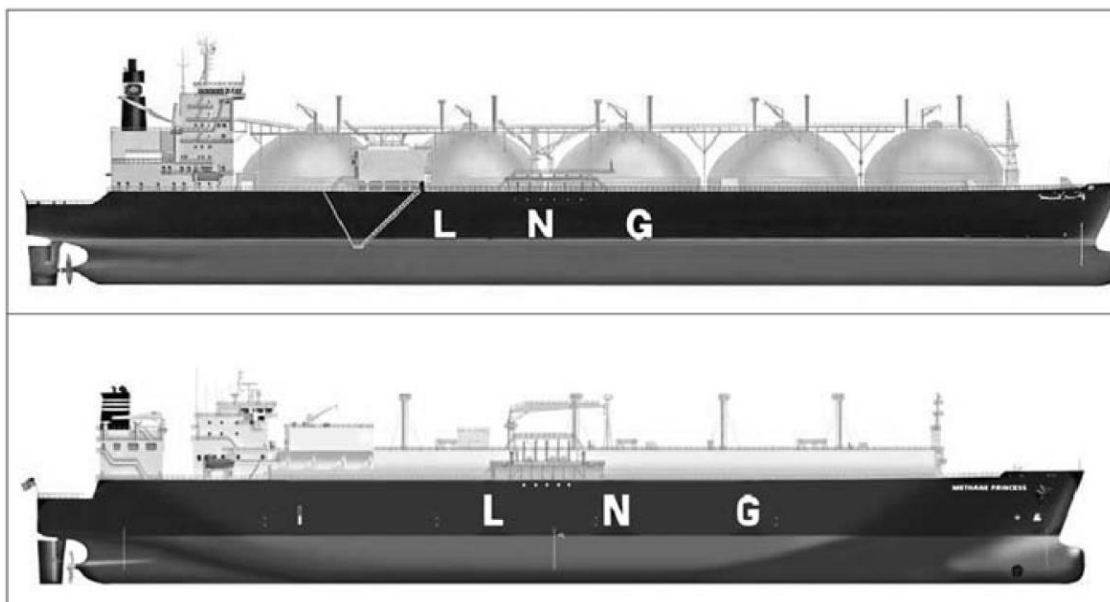
Zdaleka nejrozšířenější způsob dopravy LNG. Tankery dovolují rychle a efektivně dopravovat LNG po celém světě. Toto téma je velice rozsáhlé, protože potřeby pro přepravu LNG jsou velice různorodé. Pro menší vzdálenosti jsou zapotřebí jiné tankery, než na velké vzdálenosti. První tanker na LNG, pod názvem *Methane Pioneer*, byl postaven v roce 1945. Jednalo se o prostou nákladní loď, která byla následně přestavěna na tanker pro LNG a poprvé vyplula s nákladem LNG v roce 1959. Její skladovací kapacita byla 5088 m³. Trendem LNG tankerů je mít pořád větší a větší skladovací kapacitu, ale menší tankery mají své výhody, hlavně na krátké vzdálenosti. Největším tankerem v současnosti je *Mozah*, což je typ tankeru Q-Max se skladovací kapacitou

266 000 m³. Jelikož je ekonomicky výhodnější mít větší tankery, tak trend stále větších tankerů jen tak neskončí.

Standardizace designu LNG tankerů proběhla v letech roku 1970 a tyto pokračují jen s pár velkými modifikacemi, kromě zvětšení velikosti tankeru. Existuje ale několik základních designových kritérií, mezi něž patří:

1. Nízká hustota LNG a požadavky pro oddělení vody od LNG vyžadují velký trup s nízkým ponorem a velkou vodní desku, což je nepotopená část lodi.
2. Nízká teplota LNG vyžaduje použití speciálních drahých slitin k výrobě nádrží. Sférické tankery používají hliník, nebo 9% niklovou ocel. Membránové používají buď nerezavějící ocel nebo invar.
3. Velké teplotní výkyvy ve skladovacích nádržích vyžadují speciální podpurnou strukturu pro sférické nádrže a membránovou flexibilitu pro membránové nádrže.
4. Trup lodi je z uhlíkové oceli, takže dobrá tepelná izolace je vyžadována mezi nádrží a trupem. Navíc pro membránové nádrže je zapotřebí, aby izolace byla schopna udržet celou váhu nákladu.
5. Zařízení pro zacházení s nákladem musí být opatrně navrženo tak, aby pracovalo s teplotní expanzí a kontrakcí.

Podle těchto kritérií vznikla celá řada koncepcí, ale ve valné většině případů se využívají dvě, což jsou membránové nádrže nebo sférické nádrže. Tankery bývají většinou s dvojtým trupem. Důsledkem je mnohem větší síla a ochrana proti kolizím a podobným událostem. Výjimkou jsou tankery s parní turbínou napájenou odpařeným plynem. Podporná struktura tankerů se skládá z kombinace oceli a vysoce roztažné oceli. Tato struktura není ale navržena k přímému kontaktu s LNG, jinak by mohlo dojít ke křehnutí materiálu. Je snaha, aby všechny nové tankery byly poháněny dvojnapájecími dieselovými motory s účinnostmi od 38 do 40% v porovnání s parními turbínami s účinnostmi kolem 28%. Dieslové motory mají navíc menší emise NO_x.

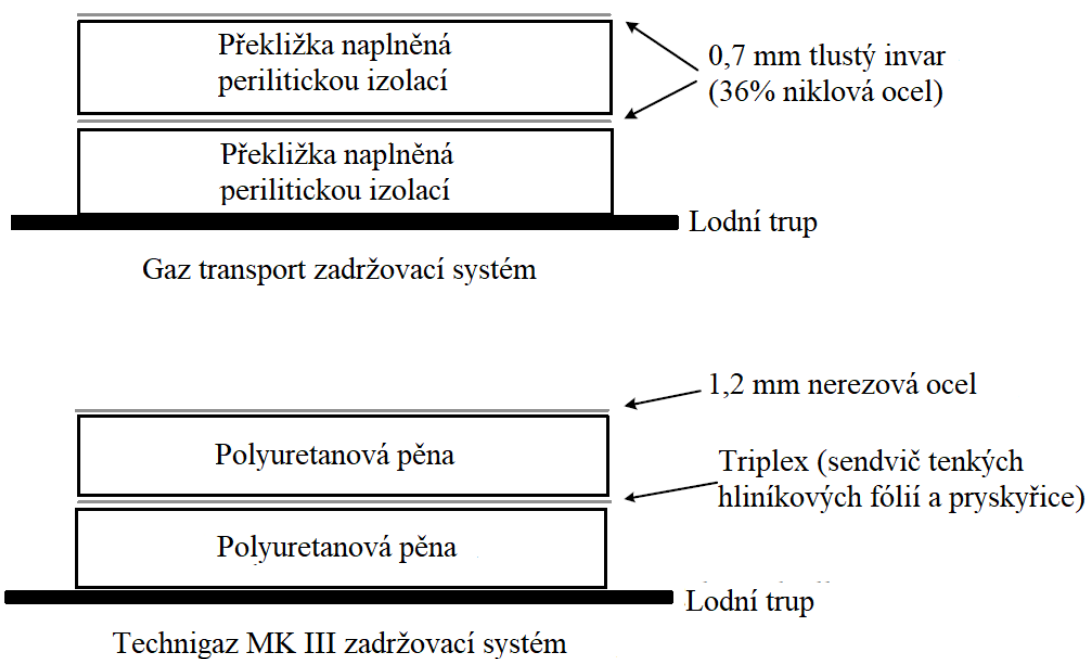


Obr. 14 – Porovnání sférických a membránových tankerů [8]

LNG tankery musí být schopny zamezit problémům, které vznikají během cesty na moři. Při cestě může docházet ke „šplouchání“ LNG v nádrži, což může poškodit integritu nádrže. Z environmentálního hlediska je snaha co nejvíce snížit emise, jak NO_x , tak i SO_x a CO_2 . Od roku 2006 jsou tankery schopny transportu LNG mezi sebou. Jedná se o tzv. ship to ship (loď na loď) transportu, kde se to povedlo lodím *Excelsior* a *Excalibur*. Obecně tankery na LNG mají velkou bezpečnost, i když se během historie LNG několik nehod stalo, pořád jsou menší o 30% až 80%, než u jiných lodních operací [7], [8].

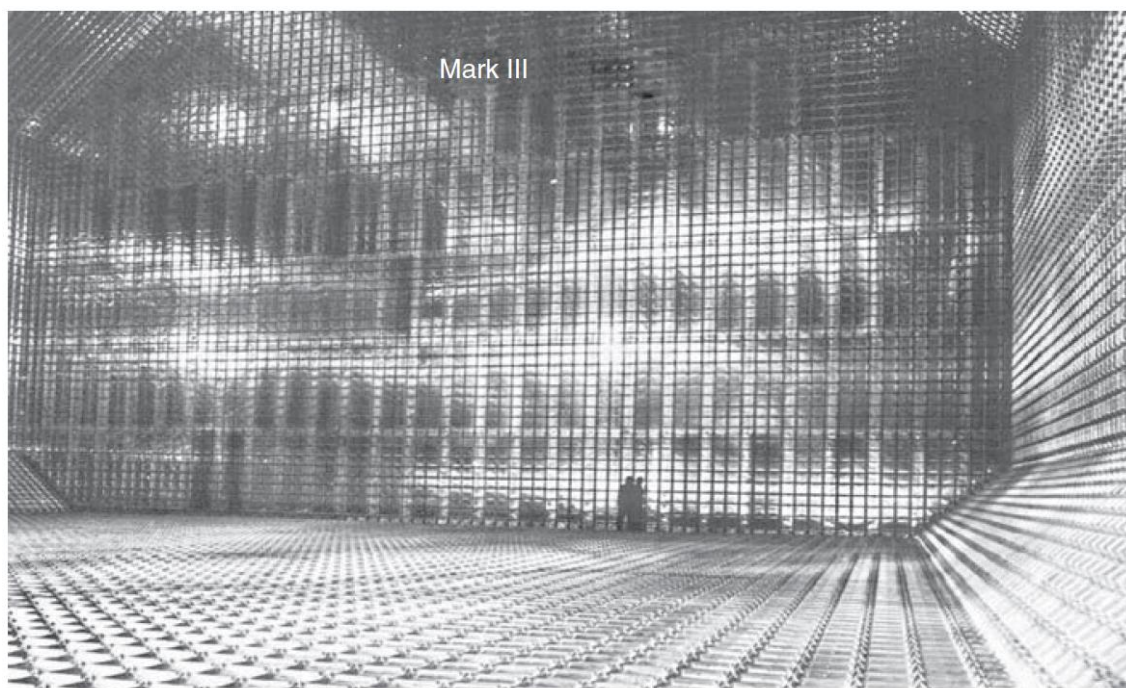
5.4.1 Membránové nádrže

Jedná se o ne samo podporující nádrže tenkých kovových membrán buď z nerezavějící oceli nebo invaru, které jsou podpořeny trupem lodi skrz tepelnou izolaci. Nejpopulárnější je využití invaru díky jeho velmi malému koeficientu teplotní expanze v požadovaných teplotách -162 až 82°C . Jsou dva typy designu, Gaz Transport (GT) a Technigaz (Mark III).



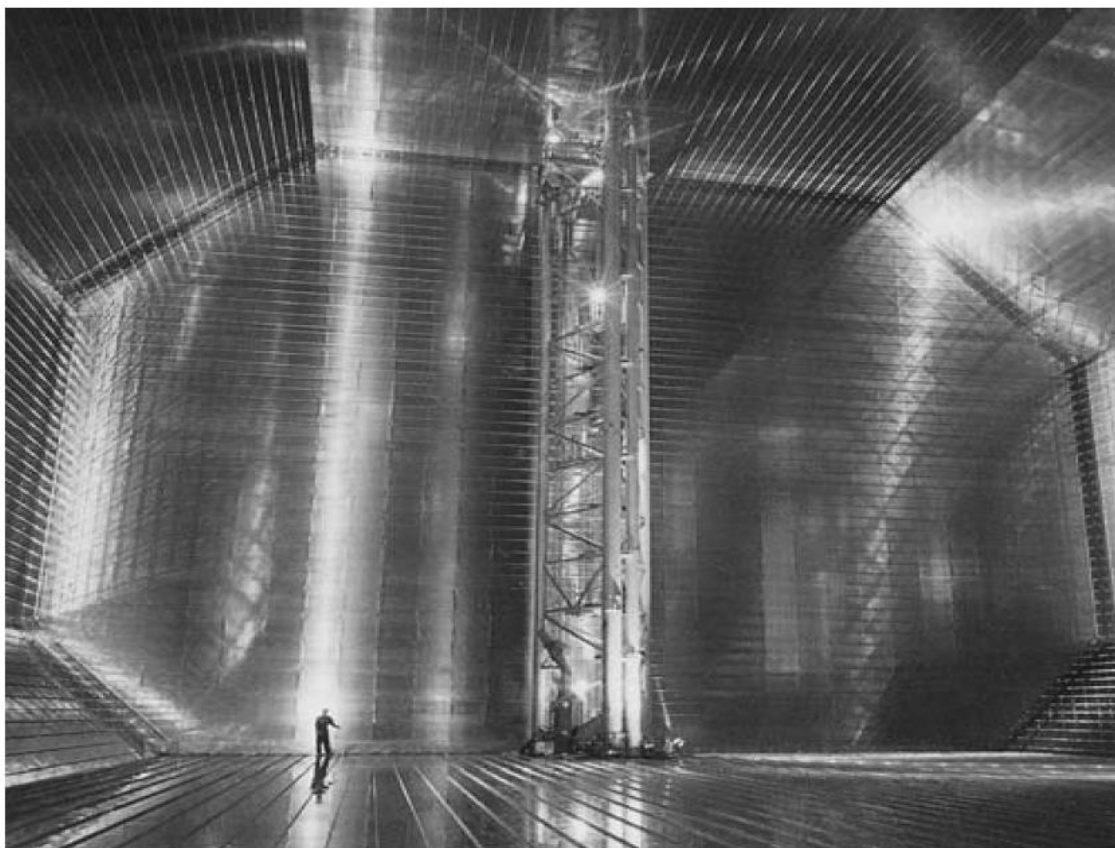
Obr. 15 – Systémy GT a Mark III [7]

Mark III design využívá propletení membrán z nerezavějící ocele, aby dovolil teplotní expanzi ve všech směrech. Tyto panely jsou následně svařeny do velkých prismatických struktur.



Obr. 16 – Membránová nádrž typu Mark III [8]

GT využívá membrány z invaru, které nepotřebují propletení, ale jsou poskládány paralelně.



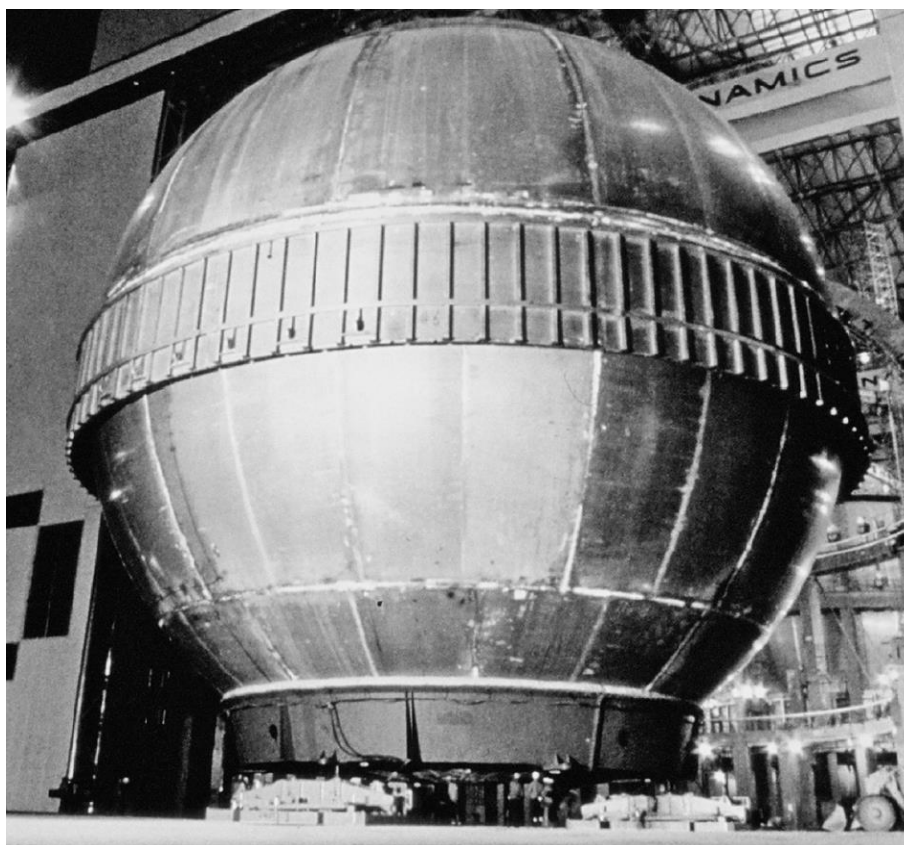
Obr. 17 – Membránová nádrž typu GT [8]

Existuje ještě Kombinovaný systém (CS 1), který využívá posílenou polyuretanovou pěnovou izolaci a dvě membrány, první hrubosti 0,7 mm z invaru a druhá z kompozitu hliníku a skelné vaty zvané triplex. Tento systém byl vytvořen, aby urychlil a usnadnil výstavbu s využitím prefabrikátů. Trpí ale úniky druhotné membrány a množství lodí využívající tento design je malý.

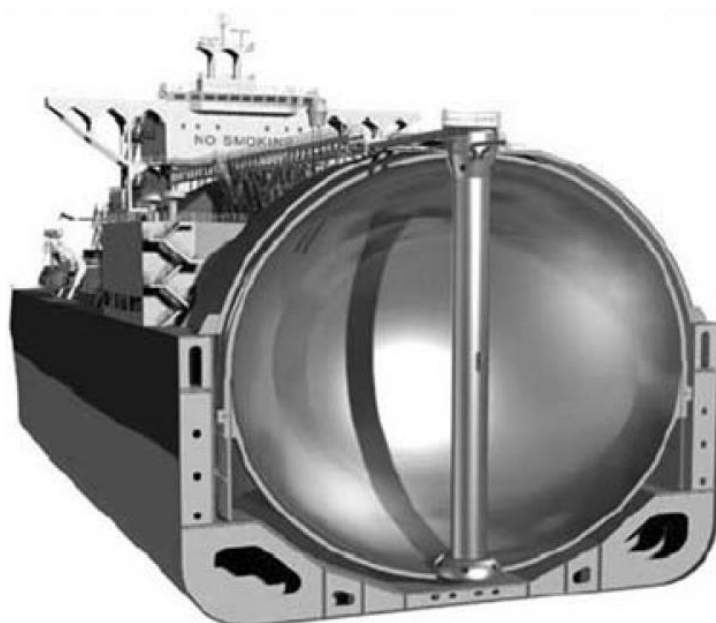
5.4.2 Sférické nádrže

Jedná se o nezávislé, sebe podporující nádrže, které netvoří část trupu a tedy na nich nezávisí síla trupu. Hlavním systémem, který se dnes používá je Mossův systém, navržen Mossem Rosenbergem Verftem. Nádrž je tvořena hrubou hliníkovou slitinou. Tyto nádrže jsou vloženy do trupu lodi. Vnější povrch nádrže je odizolován fenolovou pryskyřicí a polyuretanovou pěnou s očekávaným odparem kolem 0,15% za den. Síla nádrže je podpořena rovníkovým kruhem, tzv. úplná kruhovitá sukně, která je schopna rozložit zátěž, kterou nádrž trpí. Tato sukně je ze železa a speciální spoj mezi hliníkem a železem omezuje přenos chladu do sukně. Aby se zamezilo problémům se svařováním mezi železem a hliníkem, tak se využívá speciální spoj. Tankery obvykle mají 4 – 5 nádrží s celkovou kapacitou 125 000 m³. Velkou výhodou sférických nádrží je v tom, že jakákoliv puklina, která by mohla nastat v nádrži, by se nemohla šířit tak, aby došlo ke katastrofickým následkům a tak tedy nevyžaduje druhotnou ochranu. Kdyby ale nastaly praskliny, tak by došlo k prosakování a tedy úniku LNG a mohlo by dojít k poškození trupu lodi a proto se pod nádrže dávají druhotné ochrany, aby se tomuto zamezilo. Tyto nádrže jsou schopny zvládnout i tlak 8 barů, i když pro LNG pracují při atmosférickém

tlaku při teplotě -161°C . Nádrže jsou uloženy tak, že kolem nádrže není prakticky žádné místo.



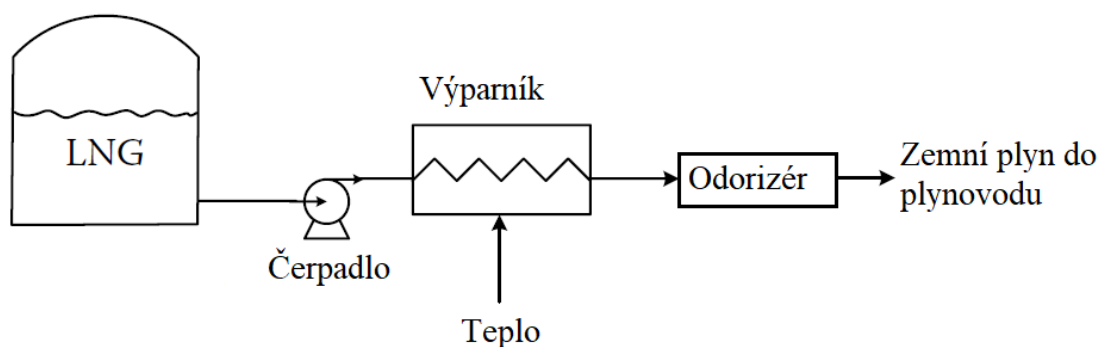
Obr. 18 – Sférická (Mossova) nádrž [7]



Obr. 19 – Uložení sférické (Mossovy) nádrže v tankeru [8]

6. Zplyňování

Zplyňování uskladněného LNG je posledním krokem celého LNG řetězce. Technika využitá v celém LNG řetězci je charakteristicky známá svou vysokou energetickou náročností (zkapalňování) nebo energetickou ztrátou (skladování a doprava). Zplyňování je proces přeměny LNG zpět na NG. Zplyňování LNG uvolňuje vysoké množství chladné energie odpovídající až 200 kWh elektřiny na tunu LNG. Jelikož pro zplyňování je zapotřebí velké množství tepla, mořská voda, vzduch nebo jiné zdroje tepla jsou zapotřebí. Dají se využít zároveň s odpadním teplem z industriálních zařízení ze zplyňovacího procesu. Obvykle, všechno odpadní teplo celého LNG řetězce (zkapalňování-skladování-zplyňování) jde do odpařování LNG, kde je potřeba velké množství tepla. Zplyňovací proces, je klíčový krok, ve využívání velkého potenciálu pro regeneraci energie. Většina zplyňovacích zařízení je provozována bez jakýchkoliv možností pro regeneraci energie. Cena zplyňovacího zařízení odpovídá zlomku ceny skladování, ale je velký nárok na jejich spolehlivost, neboť jakákoliv porucha či poškození by šlo proti smyslu zařízení [4].

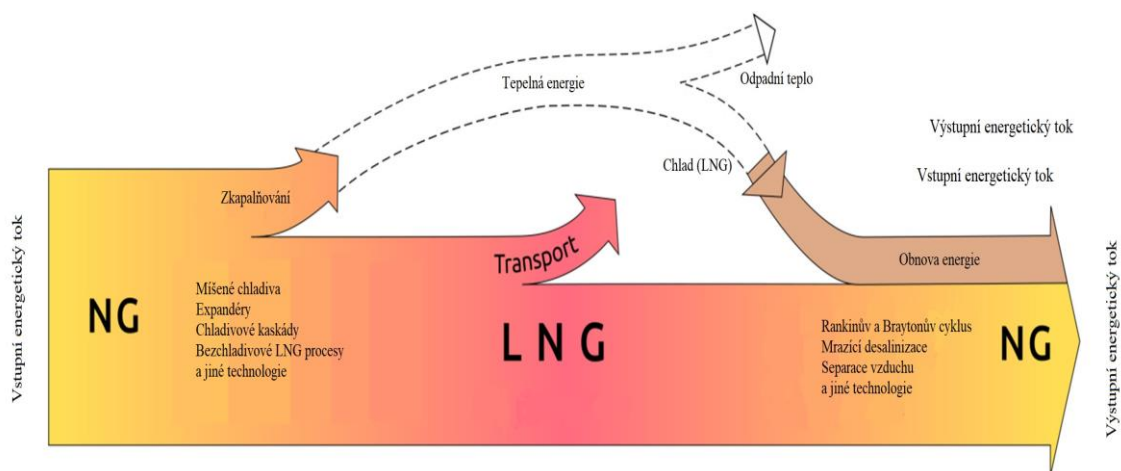


Obr. 20 – Systém zplyňování LNG [7]

LNG je odpařeno vhodným zdrojem tepla v daných geografických podmínkách. Mezi tyto klimatické faktory patří okolní teplota vzduchu, relativní vlhkost, rychlost vzduchu a teplota mořské vody. Všechny tyto podmínky se zvažují při výstavbě zplyňovacích zařízení po celém světě. Například okolní vzduch může být využit při kapalných odpařovačích nacházejících se v oblastech s teplým klimatem (Indie, Španělsko, Jižní Amerika). Z tohoto hlediska může světový klimatický efekt pozitivně ovlivnit využití chladné energie v budoucnosti. V chladnějších lokacích se dá využít mořská voda nebo aktivní ohřívání LNG. Plynem poháněné odpařovače využijí část LNG pro generaci tepla. Spotřeba NG pro plynem poháněné odpařovače se pohybuje kolem 1% až 2,5%. Provádí se výzkum s cílem vylepšit odpařovače. Jedná se o ponořené spalovací odpařovače, otevřené odpařovače, skořepinové a trubkové odpařovače.

Většina zařízení tedy nevyužívá chladnou energii, která je během zkapalňování dodaná, a tedy dochází k mrhání energie. Světově se jedná o 12 GW. Důvodem je omezený zájem třetích stran o dodání energie nebo kolísající zájem obecně. Existuje ale široké možnosti využití chladné energie. Světově ale je využíváno jenom 1% celkového potenciálu. I kdyby byl zájem o využití chladu, tak v okolí zplyňovacích zařízení není velká žádost. Budoucí trend při zplyňování LNG se tedy bude muset zaměřit na využití

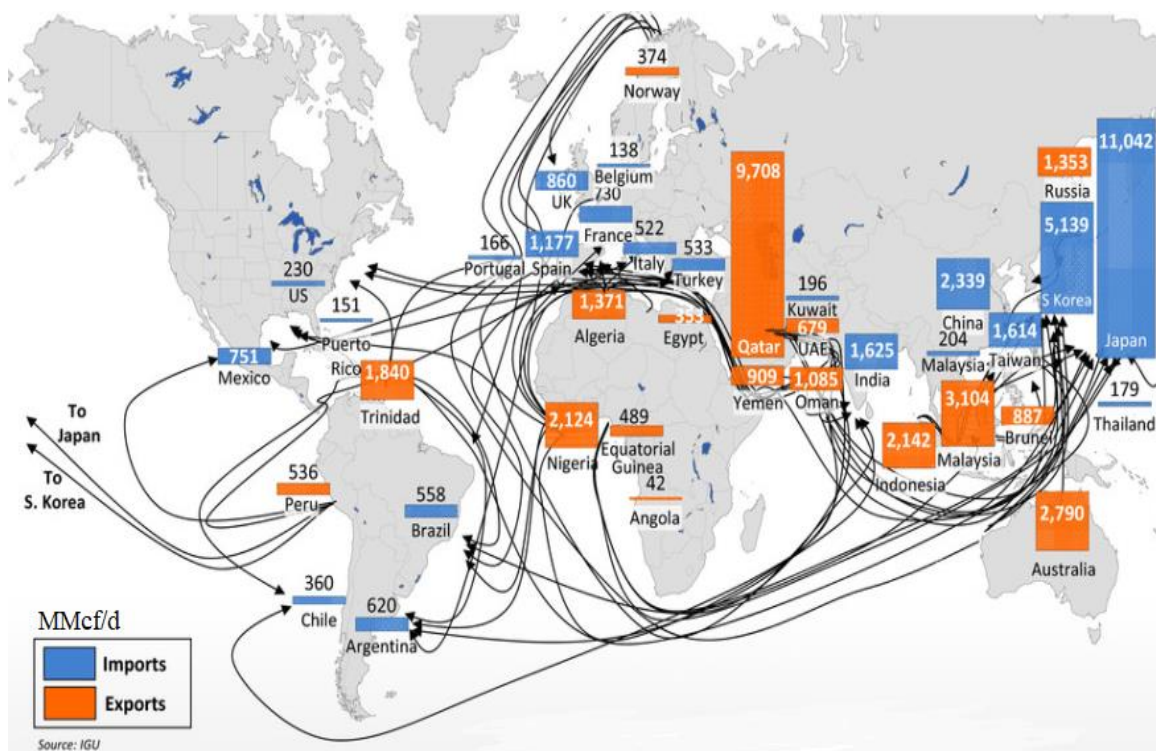
této chladné energie, čímž by došlo k mnohem širšímu zájmu o LNG. S rostoucím zájmem o LNG, které je 1,3% ročně, se z ekonomického hlediska rozhodně oplatí investovat do výzkumu v této oblasti. V současnosti operuje 60 LNG terminálu v 18 zemích a ve výstavbě je dalších 180 [4].



Obr. 21 – Energetický tok ve LNG procesu [4]

7. Využití LNG

I přesto, že LNG má 600x větší objem a tím se hodí víc pro transport než NG, dá se využít i jinak, a to je právě využít chladu LNG pro další významné procesy, čímž vlastně lze dosáhnout odpaření LNG a získání NG, které může následně být využito jinými způsoby, než být přímo pumpováno ze zplyňovacího zařízení do plynovodu. Může se jednat o mořskovodní desalinizaci, produkci tekutého dusíku nebo vzduchu a mnoho dalších možností.



1 MMcf=28,32 Mdm³

Obr. 22 – Světová mapa LNG dopravy [9]

7.1 Doprava za pomoci LNG

Doprava za pomoci LNG není nic nového a tankery, které převážejí LNG, už několik let využívají plynovo-dieslové motory, aby využili odparu LNG a tudíž NG získaného tímto odparem, než aby přišlo vniveč. Nelze ale zapomenout na automobilový průmysl. Auta, využívající těchto motorů existují, ale čerpací stanice na LNG nejsou dosti rozšířené, aby se takovéto auta staly normální záležitostí. Na trhu jsou stejně čerpací stanice na CNG, takže by čerpací stanice musely mít svůj vlastní zplynovač a zvoleným způsobem by musely využít chladné energie, aby se to ekonomicky vyplatilo. Pokud by ale auta měly nádrž na LNG, tak největším problémem by bylo to, že auta většinu času stojí na místě a jelikož dochází k samovolnému odparu, tak by došlo k různým problémům.



Obr. 23 – Doprava LNG pomocí vlaku [10]

I když využití LNG v osobních automobilech není vhodné, neznamená to, že automobilový průmysl ho nemůže využít. Odpovědí jsou kamiony přepravující LNG v oblastech, kde není k dispozici NG. Tyto kamiony by fungovaly stejně jako lodě a využívaly by odpařeného NG k pohonu motoru. I když ne velice rozšířené, od roku 2017 jsou i některé vlaky přepravující LNG poháněny zemním plynem. Využití NG má za následek i menší emise.

7.2 Průmyslové chladič systémy

Možnosti využití chladu LNG v průmyslových odvětvích je nekonečné, i když ne vždy možné. Chlad by se mohl využít ve vědeckých laboratořích pro chlazení přístrojů, které musí být pod nízkými teplotami, pro chlazení hokejových stadiónů, pro zmražení ledové plochy a následně využít NG pro ohřev stadionu, nebo i horké vody. Tyto aplikace jsou tedy možné, i když ne zrovna praktické a ekonomické. Pro současná využití by se všechny tyto zařízení musely nacházet v blízkosti LNG zařízení. LNG zařízení ale jsou stavěna v odlehlých oblastech, což tomuto zamezuje.

Většího a možného využití by mohlo dojít v agrikulturním průmyslu. LNG by mohlo být využito pro chlazení potravin. V Sicílii se nachází LNG terminál a díky přístupu ke LNG se chce využít chladu k chlazení ryb a následně využít NG k ohřevu. Další využití se nachází ve farmaceutickém průmyslu, kde některá léčiva potřebují k výrobě nízké teploty. Některé studie studují možnosti využití LNG pro chlazení obytných prostor. Možnosti využití chladu LNG jsou ohromné, ale omezení jsou také veliké.

7.3 Teplárenství a energetika

Využití LNG v teplárenství a energetice má veliký potenciál, hlavně v období léta, kde každý °C znamená jednotek % na kW energie nebo i více, záleží na specifickém zařízení. V teplárenství a energetice se využívají 2 cykly. Rankin-Clausiusův a Braytonův

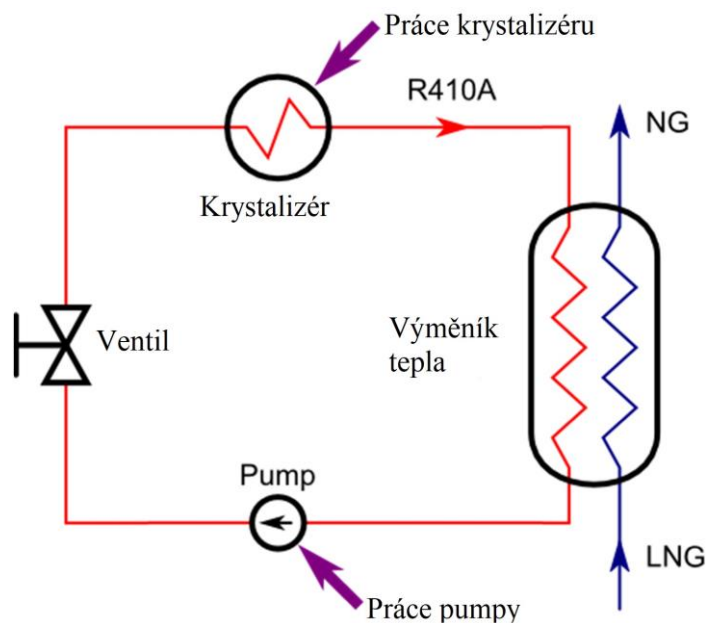
cyklus. Při Rankin-Clausiově cyklu by se mohlo LNG použít ke zvýšení efektivity kondenzátoru tak, že by se voda z chladicí věže ještě více podchladila ve výměníku voda/LNG. Získané NG by mohlo být následně využito pro vstřikování do kotle pro zvýšení efektivity spalování. Větší popularitě se ale těší Braytonův cyklus, kde se LNG využívá k ochlazení vstupního vzduchu ve výměníku, čímž se zvyšuje účinnost cyklu, ale s využitím regenerace tepla. Využívají se i kombinace obou cyklů v tzv. paroplynových obězích. Tato práce se zaměří na využití LNG v takovémto kombinovaném cyklu v následujících kapitolách.

7.4 Jiná využití

Existují i další možnosti využití, které se využívají a zaslouží si samostatnou kapitolu. Tyto využití ale potřebují speciální podmínky. Jedná se o mořskovodní desalinizaci, kryogenní vzduchová separace a zkapalňování CO_2 .

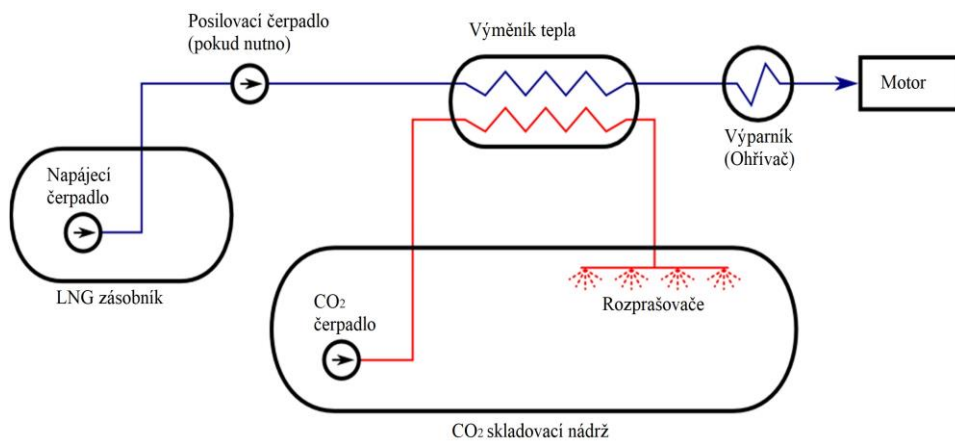
Využitím kryogenního skladování energie a zplyňování dochází ke zkapalňování vzduchu. Toto zkapalňování probíhá v obdobích mimo špičku. V případě požadavků během období špiček, zkapalněný vzduch může být použit pro přímou expanzi k získání práce na hřídeli a elektřiny. Systém obsahuje přímou LNG expanzní/výrobní subsystém a kryogenní energetický subsystém. Zplyňování probíhá ve výměnících tepla. Pro tento případ se jedná o 9 výměníků tepla. Pět z nich slouží ke zkapalňování vzduchu a čtyři pro zplyňování LNG za pomoci mořské vody a tak přímo expanduje v turbíně a napájí kompresor v sekci zkapalňování vzduchu. Tento systém je teoreticky schopen dosáhnout až 95% oběhové účinnosti ve srovnání se stávajícími 75%. Avšak specifický výkon je $161 \text{ kJ/kg}_{\text{LNG}}$ a celková energetická účinnost je přibližně 34%.

Využití chladné energie pro zmrazování mořské vody při desalinizačním procesu probíhá pouze u přímořských LNG terminálů, což ale není velký problém, protože většina terminálů je u pobřeží. Tento proces potřebuje velké množství energie pro zmrazování. Právě odpařování LNG může být využito jako ekonomický zdroj chladné energie k tomuto procesu potřebné. Při zplyňování se uvolní až $830 \text{ kJ/kg}_{\text{LNG}}$ chladu. Když se proces zplyňování LNG spojí s desalinizačním procesem, tak je možné odstranit téměř 50% soli z mořské vody za cyklus. Produkční kapacita takového zařízení je teoreticky 6,5 kg vody za každý kilogram LNG.



Obr. 24 – Mořskovodní desalinizace za použití LNG [4]

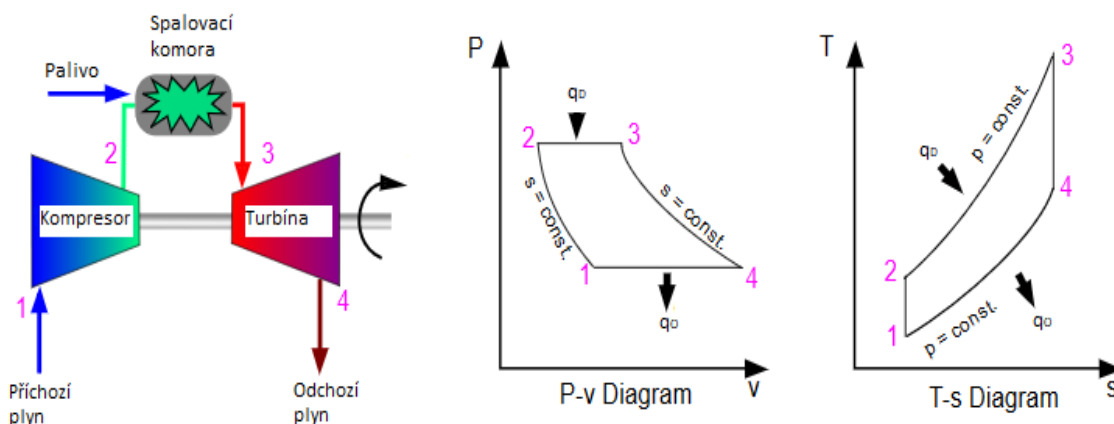
Teplota LNG je dostatečná pro zkapalnění CO_2 z plynového toku a tak se ho dá efektivně z něj odebrat a následně i jinak využít. V současnosti se využívá kombinace Braytonova a Rankin-Clausiova cyklu, spalováním LNG s čistým kyslíkem z vzduchové separační jednotky, která také využívá chladu LNG. Tento typ zkapalňování LNG má energetickou účinnost 65,5%, o 22% větší, než konvenční metody a neprodukuje téměř žádné množství CO_2 v procesu. Tato technika se dá přizpůsobit na LNG tankery [4].



Obr. 25 – Znovu zkapalnění CO_2 za použití LNG [4]

8. Účinnost Braytonova cyklu při využití LNG za ideálních podmínek

Tato kapitola se zabývá výpočtem ideálního Braytonova cyklu (beze ztrát), za ideálních podmínek. Je porovnáván obecný Braytonův cyklus s Braytonovým cyklem vylepšeným o LNG zásobník. Za pomoci LNG probíhá chlazení vstupního vzduchu ve výměníku tepla. Ochlazený vstupní vzduch je v kompresoru stlačován podle zvoleného kompresního poměru. Do spalovací komory je přiváděno palivo a s pomocí spalovací reakce je stlačený vzduch ohříván a přiveden na turbínu, kde dojde k expanzi a k ochlazení vzduchu. Vzduch odchází z cyklu ven. Diagramy popisují tento děj.



Obr. 26 – Braytonův cyklus (schéma a p-v/T-s diagramy) [11]

8.1 Výpočet Braytonova cyklu bez LNG chlazení

Vychází se z úvahy, že se jedná o ideální podmínky, z tohoto předpokladu tedy lze určit teplotu T_1 a tlak p_1 , který odpovídá tlaku p_4 . Pro výpočet je si nutno zvolit teplotu T_3 a definovat tlak p_2 .

Tabulka 2. Výchozí parametry

Teplota na vstupu do kompresoru	T_1	20	[°C]
Tlak v bodě 1 a 4	$p_1=p_4$	1	[bar]
Tlak v bodě 2 a 3	$p_2=p_3$	20	[bar]
Poissonova konstanta	K	1,4	[-]
Teplota na konci kotle	T_3	1300	[°C]
Plynová konstanta	r	287,04	$[\frac{J}{kgK}]$
Měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku	c_p	1001	$[\frac{J}{kgK}]$
Měrná tepelná kapacita za konstantního objemu	c_v	714	$[\frac{J}{kgK}]$

Pro výpočet účinnosti je potřeba znát teploty v jednotlivých bodech. Teploty pro body 1 a 3 jsou známy, ale pro body 2 a 4 ne. Pro výpočet neznámých teplot lze využít znalosti rovnic pro adiabatický děj, který se odehrává mezi body 1-2 a 3-4. Ostatní dva děje jsou izobarické. Pro výpočet je potřeba uvažovat správné jednotky.

$$T_2 = T_1 * \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 293,15 * \left(\frac{20}{1}\right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 689,94 \text{ K} = 416,79 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (8.1)$$

Pro výpočet teploty T_4 se využije stejný vzorec pro adiabatický děj, ale mezi body 3-4.

$$T_4 = T_3 * \left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 1473,15 * \left(\frac{1}{20}\right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 625,93 \text{ K} = 352,78 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (8.2)$$

Z vypočtených teplot lze spočítat účinnost cyklu. Ta se dá spočítat dvěma způsoby. Za pomoci teplot nebo vnitřních prací. Účinnosti vyjdou totožně, nebo s menší odchylkou, záleží na použitých konstantách během výpočtu cyklu.

$$\eta_t = \frac{a_T - a_K}{q_D} \quad (8.3)$$

$$\eta_t = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \quad (8.4)$$

Dosazením teplot do rovnice pro výpočet tepelné účinnosti je zjištěna účinnost cyklu za daných podmínek.

$$\eta_t = 1 - \frac{352,78 - 20}{1300 - 416,79} = 0,575 = 57,5 \%$$

Tepelná účinnost navrženého ideálního Braytonova cyklu za ideálních podmínek je 57,5%.

Pro kontrolu si lze vykreslit, jak vlastně navrhnutý Braytonův cyklus vypadá. K tomu je potřeba dopočítat entropie. Ty se dají buď vypočítat, nebo zjistit ze závislosti tlaku a teploty v tabulkách pro vzduch. Pro výpočet je potřeba si definovat nulový bod a vypočíst měrné objemy ze stavové rovnice.

$$p * v = m * r * T \quad (8.5)$$

Tato rovnice se dá zjednodušit, za předpokladu, že $m=1$, což v tomto případě platí.

$$p * v = r * T \quad (8.6)$$

Po úpravě se měrný objem spočítá jako:

$$v = \frac{r * T}{p} \quad (8.7)$$

Hodnoty entropie a teploty v bodě 0 se musí definovat. Obě se budou blížit nekonečně k nule.

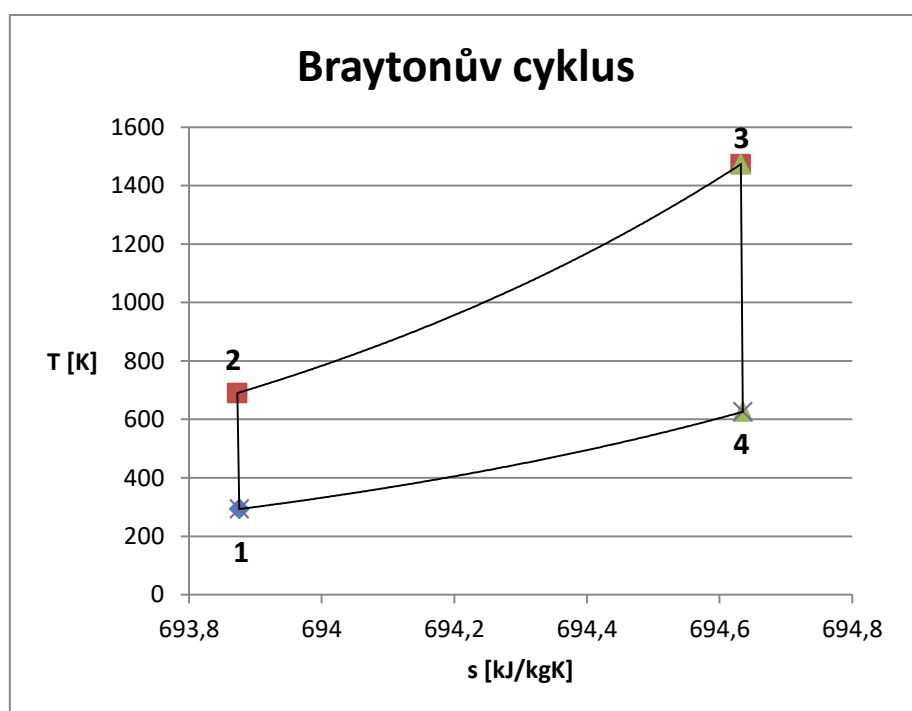
$$v = \frac{287,04 * 1^{-1000}}{1} = 2,87^{-298} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Pro zjednodušení jednotlivých výpočtů, všechny vypočtené hodnoty jsou zapsány v tabulce 3.

Tabulka 3. Entropie ve všech bodech

	0	1	2	3	4
$T [^{\circ}\text{C}]$	1E-300	20	416,79	1300	352,78
$v [\text{m}^3/\text{kg}]$	2,8704E-298	0,841	0,099	0,211	1,797
$s [\text{kJ}/\text{kgK}]$	0	693,8	693,8	694,6	694,6

Tabulka popisuje hodnoty entropie v jednotlivých bodech cyklu. Při adiabatickém ději se entropie nemění, což lze pozorovat i z T-s diagramu. V tabulce lze vidět, že tomu tak doopravdy je. Po provedení kontroly vypočtených hodnot s jednotlivými body v diagramech lze zjistit, že cyklus je navržen správně. Graf tedy bude odpovídat obecnému T-s diagramu Braytonova cyklu, což lze z obr. 27 pozorovat.



Obr. 27 – Graf vypočteného Braytonova cyklu

8.2 Výpočet Braytonova cyklu s LNG chlazením

LNG lze využít pro chlazení vstupního vzduchu do kompresoru. Smyslem tohoto výpočtu je zjistit, zda chlazením vstupního vzduchu za pomoci LNG lze dosáhnout významného zvýšení účinnosti cyklu, odpaření LNG a následně využití NG.

Z minulé kapitoly jsou k dispozici vzorce pro dané děje, které v cyklu probíhají, takže se už bude pouze dosazovat hodnoty do vzorce a výsledky zapisovat do tabulek. Teplota pro ideální podmínky je 20°C , po využití chladu LNG se tedy tato teplota zmenší. Vstupní teplota vzduchu po chlazení LNG se definuje jako 15°C , a postupně se s teplotou klesá, až na teplotu -15°C s krokem 5°C , aby byly zjištěny změny v cyklu a změna tepelné účinnosti. Nesmí být zapomenuto, že změnou teploty T_1 , dojde i ke

změně teploty T_2 , ale teploty v bodech 3 a 4 zůstanou stejné. Těmito změnami se změní vnitřní práce kompresoru a dodané teplo.

Tabulka 4. Změna teplot v bodech 1 a 2

T_1 [°C]	15	T_2 [°C]	405,02
	10		393,26
	5		381,49
	0		369,72
	-5		357,95
	-10		346,19
	-15		334,42

Teploty tedy vzájemně klesají podél izobar. Pro tento výpočet, z důvodu lepší přehlednosti výpočtu a porovnání vnitřních prací kompresoru, se využívá výpočet za pomoci vnitřních prací a dodaného tepla z předchozí kapitoly.

Ze vzorce lze vidět, že je potřeba vypočítat vnitřní práci kompresoru a turbíny. To lze získat buď rozdílem entalpií v daných bodech, nebo za pomoci teplot a měrné tepelné kapacity za konstantního tlaku. Teploty je potřeba převést na Kelviny.

$$a_t = c_p * (T_3 - T_4) = 1,001 * (1473,15 - 625,93) = 847,22 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (8.8)$$

$$a_k = c_p * (T_2 - T_1) = 1,001 * (288,15 - 678,17) = 390,02 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (8.9)$$

Dodané teplo se vypočte obdobně.

$$q_D = c_p * (T_3 - T_2) = 1,001 * (1473,15 - 678,17) = 794,78 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (8.10)$$

Pak už jenom stačí spočítat tepelnou účinnost dosazením do vzorce.

$$\eta_t = \frac{847,22 - 390,02}{794,78} = 0,575 = 57,5 \% \quad (8.11)$$

Jelikož se nemění body 3 a 4 při chlazení vstupního vzduchu, tak zůstane vnitřní práce turbíny stejná v celém výpočtu.

Tabulka 5. Výpočet účinnosti pomocí vnitřních prací a dodaného tepla při různých teplotách

T [°C]	a_t [kJ/kg]	a_k [kJ/kg]	q_d [kJ/kg]	η [-]
15	847,22	390,02	794,98	0,57510938
10	847,22	383,26	806,74	0,57510938
5	847,22	376,49	818,51	0,57510938
0	847,22	369,72	830,28	0,57510938
-5	847,22	362,95	842,05	0,57510938
-10	847,22	356,19	853,81	0,57510938
-15	847,22	349,42	865,58	0,57510938

Z výsledků je jasné vidět, že změnou teploty na sání kompresoru, nedojde ke změně účinnosti, ale dojde ke snižování vnitřní práce kompresoru. To je nejpravděpodobněji dáno tím, že jak se snižuje vnitřní práce kompresoru, zvyšuje se potřebné množství dodaného tepla, a tak v tomto případě tedy nelze získat zisk na účinnosti.

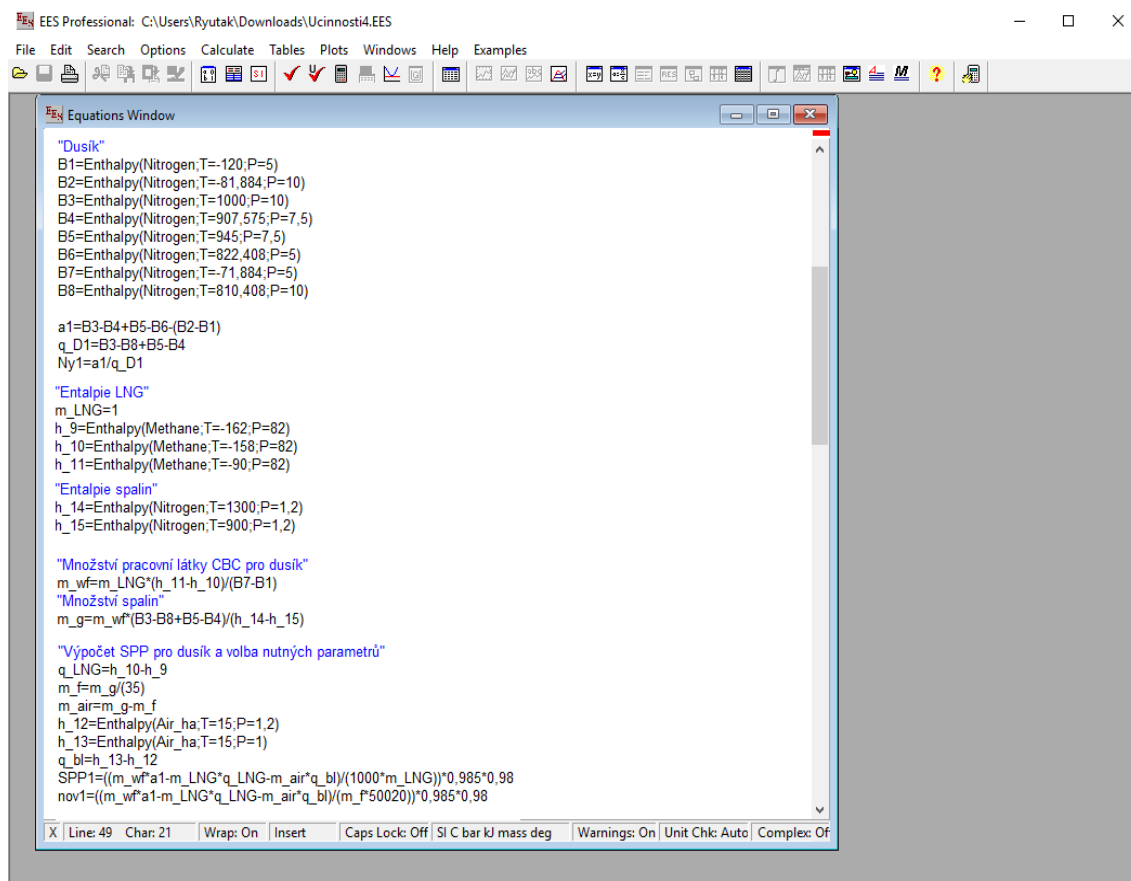
Ve výsledku ale lze zapojit nádrž na LNG do Braytonova cyklu bez jakékoliv úhony na účinnosti, čímž lze zplyňovat LNG, které následně může být využito jako palivo do spalovací komory, nebo být pouštěno do plynovodu. Další zisk je na kompresoru. Protože vzniká menší vnitřní práce kompresoru, tak není potřeba mít tak výkonný kompresor, tudíž i cena kompresoru poklesne.

9. Výpočet Braytonova cyklu s využitím regenerace energie

Z výchozí myšlenky předchozí kapitoly je zřejmé, že využití chladné energie LNG nelze zcela dosáhnout pouhým chlazením vstupního vzduchu. V této kapitole se zaměří na využití poznatků z dvou teoretických prací, *High efficiency power plant with liquefied natural gas cold energy utilization* [12] a *Thermodynamic analysis of a Brayton cycle and Rankine cycle arranged in series exploiting the cold exergy of LNG* [13]. S využitím poznatků těchto dvou prací se navrhuje postup výpočtu s využitím výpočtu z druhé práce, s cílem dokázat jejich závěry.

9.1 Využití EES

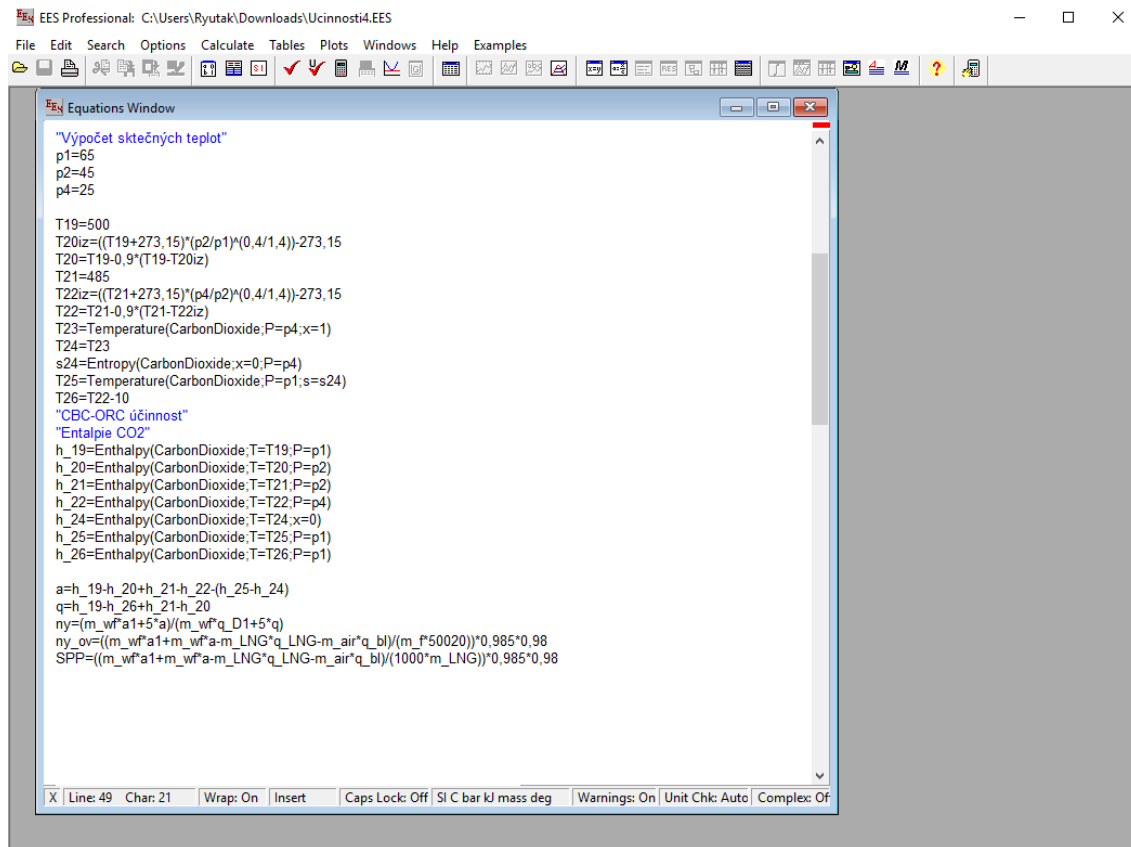
EES (Engineering Equation Solver), je software pro výpočet technických (inženýrských) výpočtů. Je jednoduchý, přehledný a obsahuje databázi pro výpočet technických parametrů (entalpie, entropie, měrný objem, suchost, atd.) pro různé látky. Je to velmi často využívaný software. Tento software je využit k výpočtu navrhované elektrárny.



Obr. 28 – Prostředí EES využitě k výpočtu Braytonova cyklu

Při návrhu elektrárny je využit EES, protože obsahuje databázi pro výpočet entalpií dusíku a hélia, které se v této diplomové práci využívají. Pro výběr potřebné látky je potřeba použít panel Function Info, kde se následně zvolí Thermophysical properties,

kde je zvolena entalpie a potřebná pracovní látka. Jedná se o funkci, která je závislá na několika možných proměnných (teplota, tlak, měrný objem, atd.), pro tento výpočet je využita závislost na teplotě a tlaku. Po volbě už jen stačí zadat parametry v daných bodech a entalpie se dá vypočítat za pomoci příkazu Solve. Na obr. 28 je ukázán způsob zápisu jednotlivých rovnic.



Obr. 29 – Přímé odkazování parametrů v EES

Při výpočtu se může přímo odkazovat na parametry předem vypočtené, nebo zadat hodnoty přímo do funkce. Obecně je lepší se odkazovat na parametry. Při změně veličin dojde automaticky k úpravě výpočtu a nemusí se využívat manuálního zápisu. V obr. 29 je znázorněn tento postup při výpočtů entalpií, kde bylo nutno měnit a přepočítávat parametry v jednotlivých bodech, čímž se výpočet výrazně zjednodušil. Této techniky se využilo, aby bylo dosaženo co nejoptimálnějšího výpočtu.

Unit Settings: SI C bar kJ mass deg						
a = 192,5	a1 = 220,7	a2 = 918,3	a3 = 894,5	a4 = 214,5	A6 = 1150	A7 = 206,4
A8 = 1132	Aa1 = 154,8	Aa2 = 193,1	Aa3 = 1402	A1 = -751,4	A2 = -551,8	A3 = 5066
A6 = 3972	A7 = -501,5	A8 = 3895	aB = 207,1	B1 = 154,8	B2 = 193,1	B3 = 1402
B4 = 1290	B5 = 1335	B6 = 1188	B7 = 206,4	B8 = 1175	B1 = -751,4	B2 = -551,8
B3 = 5066	B4 = 4585	B5 = 4780	B6 = 4142	B7 = -501,5	B8 = 4081	C1 = 208,4
C2 = 260,2	C3 = 1402	C4 = 1290	C5 = 1335	C6 = 1188	C7 = 207,3	C8 = 1177
h10 = -887	h11 = -629,3	h12 = 288,3	h13 = 288,4	h14 = 1772	h15 = 1281	h19 = 479,7
h20 = 401,1	h21 = 464,3	h22 = 346,3	h24 = -334,8	h25 = -330,8	h26 = 328	h9 = -900,6
mair = 2,697	mair2 = 2,404	mair3 = -129,9	m1 = 0,07932	m12 = 0,07071	m13 = -3,821	mg = 2,776
mg2 = 2,475	mg3 = -133,7	mLNG = 1	mwf = 4,999	mwf2 = 1,031	mwf3 = -242,9	nov1 = 0,2651
nov2 = 0,2547	nov3 = 0,2541	ny = 0,8474	Ny1 = 0,8091	Ny2 = 0,779	Ny3 = 0,7641	Ny4 = 0,7943
nyqr = 0,7838	NyB = 0,766	nyov = 0,4992	p1 = 65	p2 = 45	p4 = 25	q = 214,8
qbl = 0,04923	qD1 = 272,7	qD2 = 1179	qD3 = 1171	qD4 = 270	qDB = 270,4	qLNG = 13,63
s24 = -1,84	SPP = 1,981	SPP1 = 1,052	SPP2 = 0,9007	T19 = 500	T20 = 430,6	T20iz = 422,9
T21 = 485	T22 = 379,5	T22iz = 367,8	T23 = -12,01	T24 = -12,01	T25 = -9,547	T26 = 369,5

Obr. 30 – Výpočtová tabulka

Nedostatkem EES je jeho nepřehlednost vypočtených parametrů, jak je vidno z obr. 30. Při velkém množství rovnice je obtížné vyhledat potřebnou hodnotu. Tabulka sice má přehled jednotek, ale automaticky je nepřirazuje k dané proměnné. I když se to dá dělat manuálně, je někdy obtížné se ujistit, zda přiřazení jednotky opravdu odpovídá vypočtenému číslu. Klidně může být vypočtená jednotka v jiných jednotkách, než EES jí přidělil.

EES nemá zabudované grafické znázorňování. Pokud tedy je potřeba navrhnout a vytvořit graf, je potřeba se obrátit na jiný software, jako je například MS Excel. Pro výpočty se ale jedná o vynikající software.

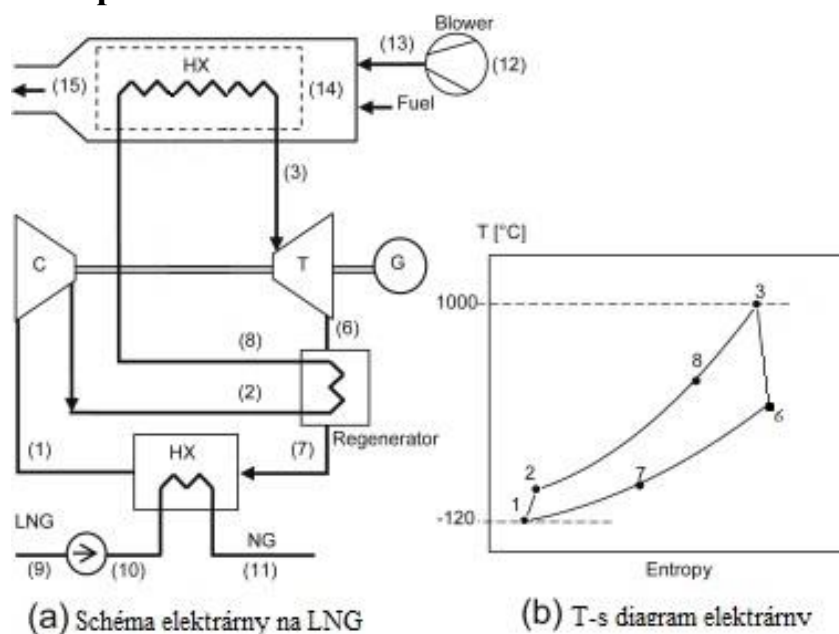
9.2 Vysokoteplotní CBC (uzavřený Braytonův cyklus) a využití LNG jako chladiče

Vychází se ze schématu a pracovních látek ze zadané práce. Jedná se o teoretický návrh elektrárny, pracující v nadkritických hodnotách, s porovnáním několika různých pracovních látek. Ve srovnání s normálními elektrárnami, je do cyklu zaveden zásobník na LNG a potřebný výměník tepla k ochlazování pracovní látky. V této práci se uvažuje helium a dusík jako dvě různé pracovní látky sloužící k porovnání s cílem zjistit, která pracovní látka je lepší a vhodnější k využití v elektrárně. V cyklu se využívá přehřívání k co největšímu využití tepla. Nejdříve se spočítá CBC bez přehřívání a poté s přehříváním aby se zjistilo, o kolik % stoupne účinnost, a zdali je nutné využití přehřívání. Jedná se o skutečný cyklus, uvažuje se tedy s účinnostmi jednotlivých funkčních částí. Elektrárna pracuje s metanem vzniklým odpařováním LNG, jako palivem do spalovací komory. Teplota na vstupu do turbíny neodpovídá teplotě spalování a dochází k velkému úniku tepla ze spalovací komory, které není nijak využito. Jednotlivé výchozí parametry, jsou uvedeny v tabulce 6.

Tabulka 6. Výchozí parametry

Teplota spalování	1300 °C
TIT (Teplota na vstupu do turbíny)	1000 °C
Teplota na vstupu do kompresoru	-120 °C
Účinnost turbíny	88%
Účinnost kompresoru	92%
Účinnost větráku	85%
Účinnost LNG čerpadla	85%
Minimální tepelný rozdíl v regenerátoru	10 °C
Minimální tepelný rozdíl v Braytonově výměníku tepla	50 °C
Vstupní teplota paliva	15 °C
Atmosférická teplota	15 °C
Tlak spalovacího vzduchu	1,2 bar
Mechanická účinnost	98,5%
Účinnost alternátoru	98%
Výhřevnost CH ₄	50 020 kJ/kg
Teplota LNG	-158 °C
Tlak NG	82 bar
Tlakový poměr	2 bary
Vstupní tlak	5 barů
Hmotnostní tok LNG	1 kg/s

9.2.1 CBC bez přehřívání



Obr. 31 – Schéma CBC elektrárny bez přehřívání

Využívá se poznatků z teoretické práce. Pro výpočet CBC bez přehřívání je vytvořeno schéma a diagram, viz obr. 31. Pracovní látka je ochlazována ve výměníku tepla (HX) s využitím chladu LNG a stlačena v kompresoru (C). Do cyklu je zaveden regenerátor, aby bylo využito výstupní teplo turbíny k ohřevu stlačené pracovní látky. Tímto způsobem klesá nutné teplo dodané do cyklu. Stlačená pracovní látka je dále ohřívána ve spalovací komoře na teplotu 1000°C. Všechno teplo ale není ve spalovací komoře využito, a tak dochází ke ztrátám. Vzduch je přiváděn do spalovací komory větrákem a jako palivo je využito NG, získané odpařením LNG ve výměníku. V porovnání s přehříváním, dojde ke změně tepelného cyklu a proto body 4 a 5 nebudou uvažovány a proto v cyklu chybí. Při výpočtu jednotlivých bodů se vychází ze zadaných parametrů. Využije se znalostí dějů z předchozích kapitol k výpočtu jednotlivých bodů s tím rozdílem, že bude počítán skutečný cyklus. Bude tedy nutno uvažovat se ztrátami. Tyto ztráty závisí na účinnostech turbíny a kompresoru. Pro výpočet skutečných teplot je potřeba znát izoentropickou teplotu, což je teplota v daném bodě bez uvažování ztrát. Skutečná teplota v turbíně a kompresoru se tedy spočítá podle uvedených vzorců. Výpočet CBC proběhne pro 2 různé pracovní látky, helium a dusík.

Skutečná teplota na turbíně:

$$T_6 = T_3 - \eta_{Tur} * (T_3 - T_{6,iz}) \quad (9.1)$$

Skutečná teplota na kompresoru:

$$T_2 = T_1 + \frac{(T_{2,iz} - T_1)}{\eta_{Komp}} \quad (9.2)$$

Tabulka 7. Parametry CBC bez přehřívání

Pracovní látka	Body	Teplota [°C]	Tlak [bar]	Entalpie $\left[\frac{kJ}{kgK}\right]$
He	1	-120	5	-751,4
He	2	-81,88415779	10	-551,8
He	3	1000	10	5066
He	4			
He	5			
He	6	789,5591618	5	3972
He	7	-71,88415779	5	-501,5
He	8	774,5591618	10	3895
N ₂	1	-120	5	154,8
N ₂	2	-81,88415779	10	193,059
N ₂	3	1000	10	1401,998
N ₂	4			
N ₂	5			
N ₂	6	789,5591618	5	1149,784
N ₂	7	-71,88415779	5	206,39
N ₂	8	774,5591618	10	1132

V tabulce 7 jsou jednotlivé parametry v daných bodech. Teplota a tlak se nemění, ale při změně pracovní látky protékající v cyklu, dojde ke změně entalpií. Pro tento případ se počítá pouze tepelná účinnost, aby se zjistilo, jestli hélium nebo dusík je lepší pracovní látkou. Potřebné veličiny pro výpočet tepelné účinnosti se neliší od předchozích kapitol, pouze rovnice, potřebné k výpočtu se mění. Cyklus se nejdříve počítá pro hélium, jako pracovní látku a poté pro dusík. Zadávané entalpie se tedy mění, a díky regeneraci tepla se zvyšuje účinnost. Bez regenerátoru by tepelná účinnost byla menší, ale nehodí se vždy. Pro tento cyklus se velmi hodí, protože teplotní rozdíl je velmi vysoký díky podchlazování za pomoci LNG.

Vnitřní práce, dodané teplo a tepelná účinnost CBC bez přehřívání se v tomto pořadí spočte podle vzorců:

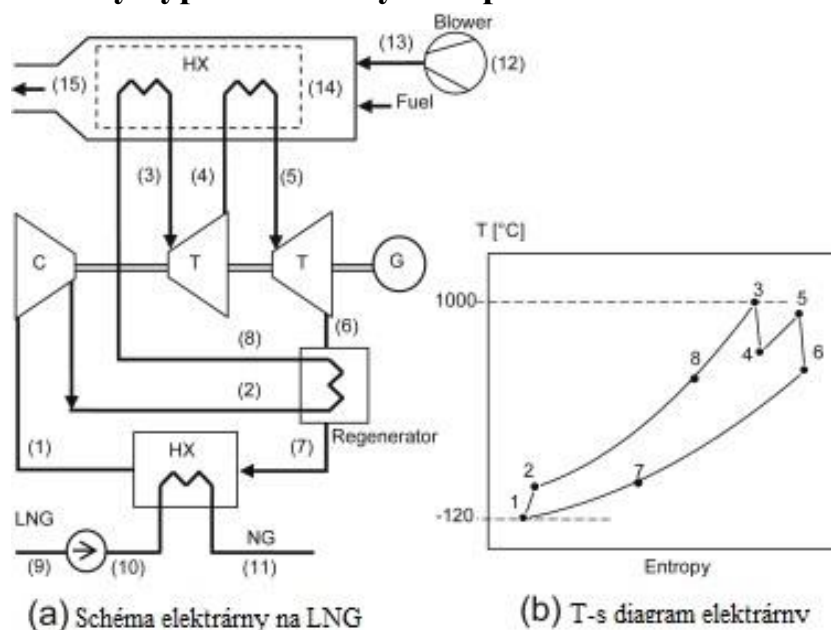
$$a_{CBC} = h_3 - h_6 - (h_2 - h_1) \quad (9.3)$$

$$q_{CBC} = h_3 - h_8 \quad (9.4)$$

$$\eta_t = \frac{a_{CBC}}{q_{CBC}} \quad (9.5)$$

Tepelná účinnost helia a dusíku odpovídá 76,41% a 79,43%, v tomto pořadí. Cyklus s dusíkem bude mít tedy větší tepelnou účinnost a hodí se více jako pracovní látka.

9.2.2 Celkový výpočet CBC cyklu s přehříváním



Obr. 32 – Schéma CBC elektrárny s přehříváním [12]

Ve srovnání s CBC cyklem bez přehřívání, ve schématu je navíc jedna turbína. Dojde tedy k přehřívání, čímž se využije větší část tepla vzniklá ve spalovací komoře. Při výpočtu jednotlivých bodů bude dodržen cyklus z obr. 32. Dojde tedy ke změně

hodnot některých bodů. Je tedy potřeba přepočítat jednotlivé body pro dané pracovní látky a nové body. Přihříváním je tedy možné se dostat do vyšších entropií a vyšších teplot, čímž vzniká zisk na účinnosti.

Tabulka 8. Parametry CBC s přihříváním

Pracovní látka	Body	Teplota [°C]	Tlak [bar]	Entalpie $\left[\frac{kJ}{kgK}\right]$
He	1	-120	5	-751,4
He	2	-81,88415779	10	-551,8
He	3	1000	10	5066
He	4	907,5757336	7,5	4585,76
He	5	945	7,5	4780
He	6	822,408327	5	4142
He	7	-71,88415779	5	-501,5
He	8	810,408327	10	4081
N ₂	1	-120	5	154,8
N ₂	2	-81,88415779	10	193,059
N ₂	3	1000	10	1401,998
N ₂	4	907,5757336	7,5	1290,165
N ₂	5	945	7,5	1335,45
N ₂	6	822,408327	5	1188,665
N ₂	7	-71,88415779	5	206,39
N ₂	8	810,408327	10	1175

Pro body 4 a 5 bylo potřeba si zvolit tlak, na kterém bude děj probíhat. Pro tento případ je zvolen tlak 7,5 barů, neboli střední hodnota mezi 5 a 10 bary. Entalpie v bodech 6 a 8 bude díky přihřívání větší, než kdyby k němu nedošlo.

V tomto případě nebude počítána pouze tepelná účinnost, ale i měrná účinnost a měrný výkon cyklu (SPP – Specific Power Performance). Jedná se o speciální druh výkonu při využití LNG. Tento výkon říká, jaký je zisk výkonu na kg_{LNG}. Postup výpočtu bude rozepsán v jednotlivých rovnicích. Počítaná vnitřní práce je celková vnitřní práce cyklu. Obsahuje tedy už vnitřní práci kompresoru a turbín.

$$a_{CBC} = h_3 - h_4 + h_5 - h_6 - (h_2 - h_1) \quad (9.6)$$

$$q_{CBC} = h_3 - h_8 + h_5 - h_4 \quad (9.7)$$

$$\eta_t = \frac{a_{CBC}}{q_{CBC}} \quad (9.8)$$

Pro výpočet obecné účinnosti a SPP je potřeba vypočítat ztráty větráku, LNG čerpadla a hmotnostní průtoky. Tyto hmotnostní průtoky se spočtou s pomocí bilančních rovnic. Pro nutné výpočty je potřeba si zvolit hodnoty.

$$\dot{m}_{LNG} * (h_{11} - h_{10}) = \dot{m}_{WF} * (h_7 - h_1) \quad (9.9)$$

Bilanční rovnice vychází ze zákona zachování energie. Energie dodané, odpovídá energii odebrané. Entalpie h_{11} a h_{10} nebyly v zadání definovány. Je tedy potřeba si zvolit určité parametry. Ze znalostí LNG a vypočteného cyklu je si tyto parametry možné definovat jako funkce teploty a tlaku. Pro entalpii h_{11} je si nutno uvědomit, že teplota by měla být o něco menší, než v bodě 7. Definuju si tedy entalpii h_{11} jako, $h_{11}=f(-90^{\circ}\text{C};82 \text{ barů})$. Pro entalpii h_{10} je teplota definována a tlak bude uvažován stejný, protože LNG je skladováno pod stejným tlakem, $h_{10}=f(-158^{\circ}\text{C};82 \text{ barů})$. Ted' lze spočítat hmotnostní průtok pracovní látky.

$$\dot{m}_{WF} = \dot{m}_{LNG} * \frac{(h_{11} - h_{10})}{(h_7 - h_1)} \quad (9.10)$$

Pro výpočet ztrát je nutno si definovat další entalpie. Tyto entalpie se dají odvodit a budou si dosti podobné. Ztráty se dají zanedbat, neboť budou mít pouze malý vliv na výsledek. Pro co ale nejpřesnější výpočet se s nimi počítá. Teplota LNG odpovídá -162°C , definuji si tedy entalpii h_9 jako, $h_9=f(-162^{\circ}\text{C};82 \text{ barů})$, na ventilátoru teplota vzduchu se měnit nebude, ale dojde k tlakovým ztrátám. $h_{13}=f(15^{\circ}\text{C};1,2 \text{ barů})$, $h_{12}=f(15^{\circ}\text{C};1 \text{ bar})$.

$$a_{LNG} = h_{10} - h_9 \quad (9.11)$$

$$a_{bl} = h_{13} - h_{12} \quad (9.12)$$

$$\dot{m}_g * (h_{14} - h_{15}) = \dot{m}_{WF} * (h_3 - h_8 + h_5 - h_4) \quad (9.13)$$

Pro výpočet hmotnostního průtoku spalín, je třeba si definovat entalpie h_{14} a h_{15} . Z cyklu se dají jasně definovat. Entalpie h_{14} odpovídá teplotě spalování při atmosférickém tlaku a entalpie h_{15} musí být menší, než teplota v bodě 13, protože došlo k přenosu tepla, tedy využití tepelné energie. $h_{14}=f(1300^{\circ}\text{C};1,2 \text{ barů})$, $h_{15}=f(900^{\circ}\text{C};1,2 \text{ barů})$.

$$\dot{m}_g = \dot{m}_{WF} * \frac{(h_3 - h_8 + h_5 - h_4)}{(h_{14} - h_{15})} \quad (9.14)$$

Pro výpočet hmotnostního průtoku paliva je potřeba si definovat β . Jedná se o poměr vzduchu a paliva. Ze skalární rovnice pro metan odpovídá hodně 17,16. Uvažuje se ale 2x přebytek vzduchu. Volím si tedy hodnotu 35.

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{m}_g}{(\beta + 1)} \quad (9.15)$$

Hmotnostní průtok vzduchu je dán jednoduchým rozdílem hmotnostního průtoku spalín a paliva.

$$\dot{m}_{air} = \dot{m}_g - \dot{m}_f \quad (9.16)$$

Měrná účinnost a SPP, vyjadřuje skutečné velikosti celého cyklu. Odčítají se tedy vnitřní ztráty a ztráty na účinnostech. Měrná účinnost určuje poměr energetického zisku k nutné tepelné energii, která musí být do cyklu dodaná. SPP je poměr energetického zisku k množství LNG k němu potřebné.

$$\eta_{ov} = \frac{\dot{m}_{WF} * a_{CBC} - \dot{m}_{LNG} * a_{LNG} - \dot{m}_{air} * a_{bl}}{\dot{m}_f * LHV} * \eta_{mech} * \eta_{alt} \quad (9.17)$$

$$SPP = \frac{\dot{m}_{WF} * a_{CBC} - \dot{m}_{LNG} * a_{LNG} - \dot{m}_{air} * a_{bl}}{1000 * \dot{m}_{LNG}} * \eta_{mech} * \eta_{alt} \quad (9.18)$$

Tabulka 9. Porovnání výsledných parametrů

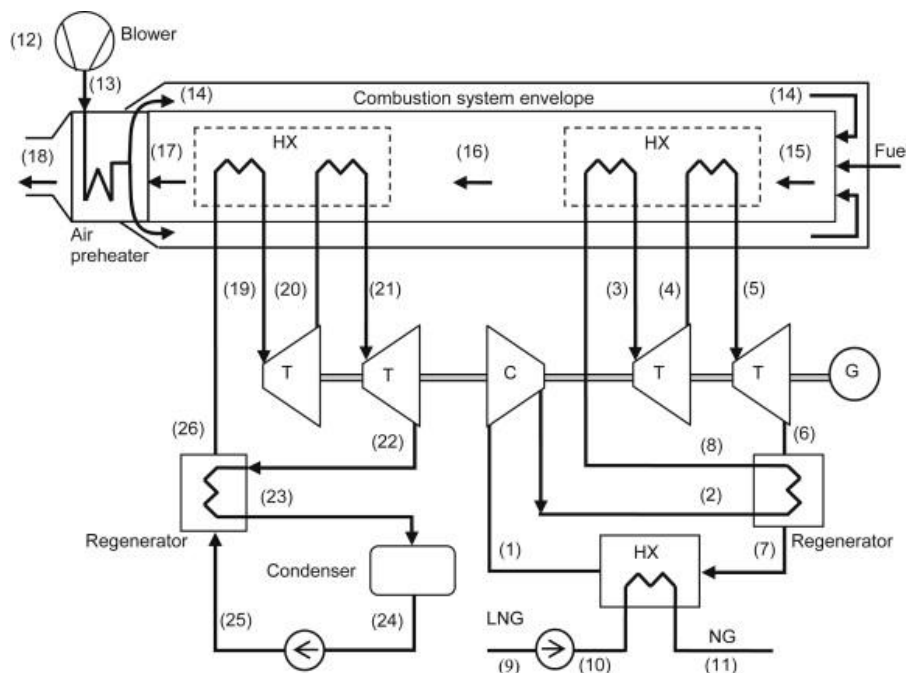
$\eta_t, \%$		$\eta_{ov}, \%$		$SPP, \frac{MW}{kg\ s} LNG$	
He	N ₂	He	N ₂	He	N ₂
77,90	80,91	25,47	26,51	0,9009	1,052

Při porovnání tepelných účinností s využitím přehřívání lze získat na tepelné účinnosti až 1%, což je velký přínos pro turbíny velkých výkonů (100 MW), ale nemusí se to oplatit pro turbíny malých výkonů (10 MW). Z výsledků je jasné, že lepší pracovní látkou obíhající v cyklu je dusík. Vypočtené hodnoty se pohybují v přijatelných mezích a mohu tedy říci, že v tomto případě výsledné závěry zadané práce skutečně odpovídají výsledkům, kromě SPP, kde ve výsledku vyšlo SPP hélia vyšší, než dusíku. Z využitých rovnic tento výsledek ale nedává smysl a musím tedy dojít k závěru, že v tomto případě došli k chybnému výpočtu.

10. Výpočet elektrárny s využitím LNG pracující s CBC a ORC cyklem v sérii

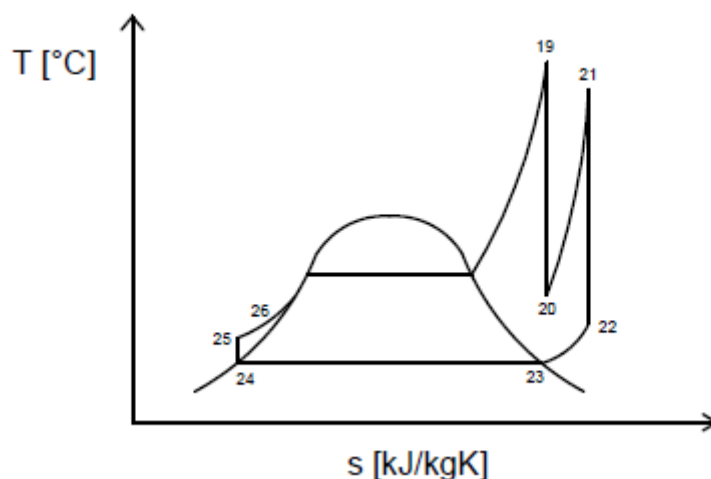
10.1 Technický výpočet elektrárny

Tento výpočet vychází z 9 kapitoly, kde se k vypočtenému CBC cyklu dopočítá RC cyklus, a vypočtou parametry takovéto elektrárny. Nejprve je si potřeba vypočítat RC cyklus. Specificky se bude jednat o ORC cyklus s CO_2 jako pracovní látkou.



Obr. 33 – Elektrárna s CBC-RC v sérii s využitím LNG [12]

ORC cyklus pracuje také s přehříváním k co nejlepšímu využití tepla. Nově je také zaveden ohřívač vzduchu. ORC cyklus využívá regenerátor k předehřevu CO_2 . Kondenzátor mění fázi CO_2 z páry zpět na kapalinu. V cyklu se už nevyužívá LNG, jinak je princip totožný, jako v CBC cyklu. Pro lepší znázornění, jak cyklus bude vypadat, bude ORC cyklus znázorněn v mnou navrženém T-s diagramu pro CO_2 .



Obr. 34 – T - s diagram ORC cyklu

Z bodu 24 do 25 dochází k čerpání CO_2 a tak vzniká vnitřní práce čerpadla. Ohřevem v regenerátoru se dostanu z bodu 25 do bodu 26 a ohřevem ve spalovací komoře se mění skupenství z tekutiny na plyn. Dochází k expanzím a následnému přehřívání v turbínách. Druhá turbína ale není schopna zcela využít energii obsaženou v CO_2 . Dochází teda k dochlazení v regenerátoru, kde se získá děj z bodu 22 do bodu 23. Poté se už CO_2 jenom zkondenzuje v kondenzátoru.

Z výchozí práce nejsou dány žádné parametry, z kterých by se dalo vycházet, ale určité parametry si jde odvodit. Výchozím parametrem bude kritický bod CO_2 . Ten odpovídá 73,77 barům při teplotě 30,98 °C. Je tedy potřeba si zvolit výchozí hodnoty.

Tabulka 10. Výchozí parametry pro RC cyklus

p_1	65 barů
p_2	45 barů
p_3	25 barů
T_{19}	500 °C
T_{21}	485 °C
Účinnost turbíny	90%
Účinnost čerpadla	85%

Ze základních znalostí tepelných cyklu se už lehce dají dopočítat ostatní body. Bude se opět jednat o skutečný cyklus, tedy se uvažuje výpočet s účinnostmi turbíny a nově účinností čerpadla. Výsledné hodnoty jsou pro přehlednost uvedeny v tabulce 11.

Tabulka 11. Parametry RC cyklu

Body	Teplota	Tlak	Entalpie
19	500	65	479,7
20	423,9	45	401,1
21	485	45	464,3
22	450,4	25	346,3
23	-12,01	25	-71,12
24	-12,01	25	-334,8
25	-10,76	65	-330,8
26	440,4	65	328

Výpočet tepelné účinnosti bude znova vycházet z vnitřní práce a dodaného tepla, ale pro entalpie CO₂.

$$a_{RC} = h_{19} - h_{20} + h_{21} - h_{22} - (h_{25} - h_{24}) \quad (10.1)$$

$$q_{RC} = h_{19} - h_{26} + h_{21} - h_{20} \quad (10.2)$$

$$\dot{m}_g * (h_{16} - h_{17}) = \dot{m}_{WF} * (h_{19} - h_{26} + h_{21} - h_{20}) \quad (10.3)$$

$$\dot{m}_{air} * (h_{14} - h_{13}) = \dot{m}_g * (h_{17} - h_{18}) \quad (10.4)$$

$$\dot{m}_{WF} = \dot{m}_{LNG} * \frac{(h_{11} - h_{10})}{(h_7 - h_1)} \quad (10.5)$$

Jedná se o účinnosti tepelných cyklů v sérii. Do rovnic se tedy přidává CBC a ORC zároveň a tím se získávají účinnosti a měrný výkon CBC-RC v sérii. Z předchozí kapitoly se došlo k závěru, že pro CBC je lepší pracovní látkou dusík. Počítá se tedy s hodnotami CBC pro dusík.

$$\eta_t = \frac{\dot{m}_{WF} * a_{CBC} + \dot{m}_{WF} * a_{RC}}{\dot{m}_{WF} * q_{CBC} + \dot{m}_{WF} * q_{RC}} \quad (10.6)$$

$$\eta_{ov} = \frac{\dot{m}_{WF} * a_{CBC} + \dot{m}_{WF} * a_{RC} - \dot{m}_{LNG} * a_{LNG} - \dot{m}_{air} * a_{bl}}{\dot{m}_f * LHV} * \eta_{mech} * \eta_{alt} \quad (10.7)$$

$$SPP = \frac{\dot{m}_{WF} * a_{CBC} + \dot{m}_{WF} * a_{RC} - \dot{m}_{LNG} * a_{LNG} - \dot{m}_{air} * a_{bl}}{1000 * \dot{m}_{LNG}} * \eta_{mech} * \eta_{alt} \quad (10.8)$$

Tabulka 12. Výsledné hodnoty CBC-RC cyklu v sérii

N ₂ -CO ₂		
η_t	η_{ov}	SPP
84,74	49,92	1,981

Pro srovnání bude navržen tento cyklus, ale bez využití chladné energie LNG. Bude třeba vyjít z několika předpokladů v tomto případě. Jelikož LNG je využito v CBC cyklu, je třeba si určit vstupní teplotu na kompresoru. Bude se vycházet z předpokladu, že T_1 se blíží T_7 . Bude tedy nutno přepočítat teplotu T_2 . Po přepočtu je už možné spočítat účinnost CBC bez LNG. Co se týče ORC, tak není potřeba nic přepočítávat. Bude se uvažovat N₂-CO₂ varianta pracovních látek.

Tabulka 13. Porovnání cyklů s a bez využití LNG

Tepelná účinnost η_t [%]			
CBC		CBC-ORC	
S LNG	Bez LNG	S LNG	Bez LNG
80,91	76,6	84,74	77,79

Využitím LNG je tedy možno dosáhnout v tomto případě až 6% navýšení tepelné účinnosti. Navíc se NG získané odpařením LNG dá použít jako palivo k pohonu cyklu. Ve výsledku mnou navržený cyklus dosáhl 6% navýšení účinnosti ve srovnání s 8% navýšením zadané práce. Toto je ale přijatelná chyba z důvodu neznámých volených parametru RC cyklu výchozí práce. Mohu tedy potvrdit jejich dosažené závěry a potvrdit, že využití chladné energie LNG v energetice má budoucnost, ale prozatím pouze ve specifických případech, jako byl tento nadkritický cyklus s CBC-RC v sérii.

10.2 Ekonomické zhodnocení elektrárny

Z technické stránky, využitím LNG se může zvýšit účinnost tepelných cyklů využívajících energii chladu, ale vyplatí se z ekonomického hlediska dostavovat potřebnou infrastrukturu? Tato kapitola se zabývá touto otázkou.

Pro využití LNG v navržené elektrárenské technologii je ve srovnání s konvenčními elektrárnami, potřeba dostavět zásobník a výměník tepla pro LNG. Tyto komponenty jsou tou nejdražší částí dobudování potřebné infrastruktury. Další náklady spojené s instalací (potrubí, izolace, atd.), nejsou z ekonomického hlediska pro tento výpočet významné a je tedy možné je ve fázi projekčního návrhu zanedbat.

V navržené technologii je hmotnostní tok LNG 1 kg/s. Pro výpočet je nutno zjistit spotřebu LNG za den. To vychází kolem 86,4 t/den. Pro správný chod elektrárny bude tedy potřeba mít zásobník s potřebným objemem + zálohou. Volím si tedy potřebný objem zásobníku 90 t. Zásobník je volen od společnosti CHART, která vyrábí zásobníky pro LNG. Nabízí výrobu a stavbu několika typů zásobníků na LNG. Pro potřeby této práce je využit jejich největší zásobník 2x VT108/11 (2x45t). Jedná se tedy o 2 zásobníky VT108/11, ale cenově se oplatí více využít dané nabídky. Tento zásobník tedy splňuje potřebnou kapacitu LNG.

Cena zvoleného zásobníku je 10 800 000 Kč, ale v této ceně není zahrnuta cena zprovoznění a provozu. Cena pro zprovoznění zásobníku je 1 000 000 Kč, přičemž roční provozní náklady odpovídají 150 000 Kč. Ve výsledku jsou náklady pořízení a provozu zásobníku v prvním roce 11 950 000 Kč.

Cenu výměníku tepla je těžko určit bez detailního výpočtu, ale obecně se pohybuje blízko ceny zásobníku. V této práci nebyl výpočet výměníku realizován, a tak se tedy uvažuje stejná cena, jako pro zásobník, a to 11 000 000 Kč. V součtu cena potřebné infrastruktury odpovídá 22 950 000 Kč. Při uvažování zanedbaných nákladů by cena byla vyšší.

Elektrárna tedy musí pokrýt ziskem na účinnosti tuto cenu. Jako modelový případ pro ekonomické posouzení byla zvolena centrála se svorkovým výkonem 100 MW, což odpovídá výrobě elektrické energie 100 MWh každou hodinu provozu. Zvolený výkon odpovídá elektrárně bez využití chladu LNG. S využitím chladné energie LNG, podle výpočtu prezentovaného v této práci, dojde k zvýšení účinnosti o 6%.

$$P = \frac{P_{zv}}{\eta_s} * \eta_{LNG} = \frac{100}{0,7779} * 0,8474 = 108,93 \text{ MW} \quad (10.9)$$

Zisk na výkonu tedy odpovídá 8,93 MWh. Cena za kWh elektřiny je 2 Kč. Za rok se vyprodukuje 78 226 800 kWh. Při ceně 2 Kč za kWh, za rok je schopna tato elektrárna vydělat o 156 453 600 Kč více, než kdyby nedošlo k využití chladné energie LNG. Při srovnání ceny potřebné k vybudování potřebné infrastruktury a ceny, kterou je elektrárna schopna vydělat je patrné, že návratnost je kolem 1 roka. Při menších výkonech doba návratnosti stoupá. Je třeba tedy zvážit, kde se takováto vylepšení hodí, a kde ne.

11. Závěr

Cílem diplomové práce bylo seznámit se s problematikou spjatou s LNG. Provést rešerši o jednotlivých částech LNG procesu, možném využití chladné energie a realizovat modelový výpočet s cílem dokázat, že lze využitím chladu LNG dosáhnout zvýšení účinnosti v energetických procesech.

V úvodu bylo uvedeno seznámení s tím, co to vlastně LNG je, jeho historií a jeho vlastnostmi. Teoretická část se zabývala detailním popisem LNG řetězce technologií. Jednalo se o zkapalňování, skladování, dopravu a zplyňování.

Energeticky nejnáročnější, je proces zkapalňování a bylo dokázáno, že lze tento proces zefektivnit. Došlo k obecnému seznámení s procesem zkapalňování, jaké cykly se využívají ke zkapalňování, a k seznámení s různými experimentálními postupy k možným vylepšením stávajících procesů. Zkapalněný zemní plyn se musí nějak uskláňovat, a tak došlo k seznámení s možnostmi uskláňování zemního plynu a problémy, které mohou nastat. Dvě hlavní kategorie byly nadzemní a podzemní skladování. Důležitou částí byla ale doprava LNG. LNG se může dopravovat několika způsoby, podle dané potřeby, ale nejdůležitější a nejvíce rozšířená je doprava tankery. Na toto téma, byla důkladně vypracována kapitola, kde došlo k seznámení s různými druhy tankerů. Zplyňování je proces, který je nejproblémovější, protože dochází u něj k mrhání 99% chladné energie, která byla dodána při zkapalňování. Zaměřilo se na různé způsoby zplyňování.

Při všech těchto procesech dochází k různým ztrátám energie, takže v poslední teoretické kapitole jsou posouzeny možnosti využití LNG v rámci různých procesů. Od využití přirozeného odparu LNG během dopravy k využití chladu v různých průmyslových aplikacích, včetně energetiky.

Výpočtová část se zaměřila na způsoby zlepšování energetických cyklů. Nejprve byl posouzen Braytonův cyklus s cílem dokázat, že chlazením vstupního vzduchu dojde k zlepšení účinnosti cyklu, to se ale nedokázalo, i když využití LNG v tomto případě mělo pozitivní následky. Proto byla pozornost zaměřena na poznatky teoretických prací s cílem dokázat jejich závěry. Zjistilo se, že nejlepší využití má LNG při nadkritických parametrech a pro zvyšování účinnosti cyklu je nutno do cyklu zakomponovat regenerátor. Pro největší zisky se ukázalo, že je vhodné využít kombinaci CBC a ORC cyklu.

Při porovnání cyklů s LNG a bez LNG byl formulován závěr, že jde získat až 6% na účinnosti. Využití LNG se nejvíce oplatí pouze u nadkritických cyklů, kterých není zase tolik a nejlépe pro turbíny velkých výkonů, kde je dosahováno rychlejších návratností. Využití LNG v energetických procesech tedy má budoucnost.

12. Seznam použitých zdrojů

- [1] Liquefied natural gas. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Liquefied_natural_gas
- [2] The LNG Process Chain. In: *International Group of Liquefied Natural Gas Importers* [online]. Francie: GIIGNL, 2009 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: https://giignl.org/sites/default/files/PUBLIC_AREA/About_LNG/4_LNG_Basics/090801publique lngbasics lng 2 - lng supply chain 7.3.09-aacommments.pdf
- [3] Porovnání LPG, CNG, LNG a BIOplynu. *LEVNEVOZENI* [online]. Česká Republika: ALL4CAR, 2019 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.levnevozeni.cz/porovnani-lpg-cng-lng-a-biopolyu/>
- [4] J. Pospíšil, P. Charvát, O. Arsenyeva, L. Klimeš, M. Špiláček, J. J. Klemeš. *Energy demand of liquefaction and regasification of natural gas and the potential of LNG for operative thermal energy storage*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 99 (2019), pp. 1-15, [10.1016/j.rser.2018.09.027](https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.027)
- [5] Atlantic LNG Train 4 “The World’s Largest LNG Train”. In: *ConocoPhillips* [online]. Doha: ConocoPhillips, 2004 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: http://static.conocophillips.com/files/resources/smids_016_atlantictrain.pdf
- [6] WOODWARD, John Lowell a Robin PITBLADO. *LNG risk based safety: modeling and consequence analysis*. Hoboken, N. J.: Wiley, c2010. ISBN 04-703-1764-7.
- [7] KIDNAY, A. J. a William Rutledge PARRISH. *Fundamentals of natural gas processing*. Boca Raton: CRC Press, c2006. Mechanical engineering series (Boca Raton, Fla.), 200. ISBN 08-493-3406-3.
- [8] NASR, G.G. a N.E. CONNOR. *Natural gas engineering and safety challenges: downstream process, analysis, utilization and safety*. New York: Springer, 2014. ISBN 9783319089485.
- [9] The magic of LNG. In: *Eniday* [online]. Italy: SPARK, 2017 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: https://www.eniday.com/en/sparks_en/lng-technology-markets/
- [10] Transporting natural gas by train: the greener way to go. In: *NIKKEI* [online]. Japonsko: NIKKEI, 2018 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://asia.nikkei.com/Business/Markets/Commodities/Transporting-natural-gas-by-train-the-greener-way-to-go>
- [11] Brayton cycle. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2019 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Brayton_cycle

- [12] M. R.Gómez, R. F.Garcia, J. R. Gómez, J. C. Carril. *High efficiency power plant with liquefied natural gas cold energy utilization*. Journal of the Energy Institute, 87 (2014), pp. 59-68, [10.1016/j.joei.2014.02.007](https://doi.org/10.1016/j.joei.2014.02.007)
- [13] M. R.Gómez, R. F.Garcia, J. R. Gómez, J. C. Carril. *Thermodynamic analysis of a Brayton cycle and Rankine cycle arranged in series exploiting the cold exergy of LNG (liquefied natural gas)*. Energy, 66 (2014), pp. 927-937, [10.1016/j.energy.2013.12.036](https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.12.036)

13. Seznam použitých značek a symbolů

Zkratky	Význam
He	helium
N ₂	dusík
CO ₂	oxid uhličitý
LNG	zkapalněný zemní plyn
NG	zemní plyn
CBC	uzavřený Braytonův cyklus
RC	Rankin-Clausiusův cyklus
EES	Engineering Equation Solver
MMcf/d	milión metrických stop za den
V(1,2,3)	výměník (1,2,3)

Index	Význam
t	tepelná
t, k	turbína, kompresor pro vnitřní práci
D	teplo dodané
Tur	turbína, pro účinnost
Komp	kompresor, pro účinnost
WF	pracovní látka
bl	větrák
g	spaliny
f	palivo
air	vzduch
ov	celková
mech	mechanická
alt	alternátor
zv	zvolený výkon

Značka	Název	Veličina
T_x	Teplota v daném bodě	[°C]
p_x	Tlak v daném bodě	[bar]
κ	Poissonova konstanta	[-]
r	Plynová konstanta	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
c_p	Měrná tepelná kapacita, p=konst.	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
c_v	Měrná tepelná kapacita, v=konst.	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
η	Účinnost	[%]
\dot{m}	Hmotnostní tok	[kg.s ⁻¹]
v	Měrný objem	[m ³ .kg ⁻¹]
s	Entropie	[kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
a	Vnitřní práce	[kJ.kg ⁻¹]
q	Dodané teplo	[kJ.kg ⁻¹]
h	Entalpie	[kJ.kg ⁻¹]
LHV	Výhřevnost	[kJ.kg ⁻¹]
SPP	Měrný výkon	[MW.kg ⁻¹ .s ⁻¹]
W	Mechanická energie	[J]
P	Svorkový výkon	[MW]